

GAZI
JOURNAL OF
ENGINEERING
SCIENCES



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

EDİTÖR / EDITOR - IN – CHIEF

İsmail ŞAHİN

Gazi University, Ankara, Turkey
e-mail: editorgjes@gmail.com

YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSOCIATE EDITORS

Harun GÖKÇE

Gazi University
e-mail: harungokce@yahoo.ca

Volkan YILMAZ

Gazi University
e-mail: volkan@gazi.edu.tr

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Abdullah AKDOĞAN

Pamukkale University

Alper BÜYÜKKARAGÖZ

Gazi University

Amin MIRZAPOUR

Zanjan İslami Azad University

Ayhan AYTAÇ

National Defense University

Bülent ÖZKAN

Gazi University

Erdem CÜCE

Recep Tayyip Erdoğan University

Fecir DURAN

Gazi University

Fatih ŞAHİN

Gazi University

G. Serdar TOMBUL

ASELSAN

Halil KARAKOÇ

Hacettepe University

Hüseyin GÖKÇE

Çankırı Karatekin University

M. Hanefi CALP

Karadeniz Technical University

Mustafa BOZ

Karabük University

Mustafa GÜNAY

Karabük University

Serhat KARAP

TUBİTAK-SAGE

Tayfun MENLİK

Gazi University

Umit ATİLA

Gazi University

YAYIN DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

Adnan SÖZEN

Gazi University, Turkey

Andrew PINKERTON

Lancaster University, England

Bekir Sami YILBAŞ

King Fahd University, Sudia Arabia

Farzollah MIRZAPOUR

University of Zanjan, Iran

Herbert M. REYNOLDS

Michigan State University, USA

Majid MEGHDADI

University of Zanjan, Iran

Mustafa KURT

Gazi University, Turkey

Nowruz ALLAHVERDİ

Karatay University, Turkey

Reza Negarastani

RIETEX, England

Salman NISAR

National University of Sci. and Tech., Pakistan

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Jamal KHATIB

University of Wolverhampton, England

John KINUTHIA

University of South Wales, England

Jonathan C. BORG

University of Malta, Malta

Hossam KISHAWY

University of Ontario Technology, Canada

Kürşad SEZER

Gazi University, Turkey

Shahin JALILI

Tebrez University, Iran

Şakir TAŞDEMİR

Selçuk University, Turkey

Tahsin Tecelli ÖPÖZ

John Moores University, England

Yasir JOYA

GIK Institute, Pakistan

DİL EDITÖRLERİ / LANGUAGE EDITORS**Türkçe/Turkish:** V. Savaş YELOK (Hacı Bayram Veli University)**İngilizce/English:** H. Kürşad SEZER (Gazi University)**TEKNİK EDITÖR / TECHNICAL EDITOR****Neslihan TOP**

Gazi University

Nurullah YÜKSEL

Gazi University

e-mail: editorgjes@gmail.com**BU SAYININ HAKEMLERİ / REVIEWER OF THIS ISSUE**

Afşin GÜNGÖR

Ahmet BABALIK

Alper ERGÜN

Ayşe DEMİRHAN

Ayşenur ASLAN

Bahar UYMAZ

Belgin KARABACAKOĞLU

Boyang HUANG

Cemal YILMAZ

Ç. Vakkas YILDIRIM

Ebru SARALOĞLU GÜLER

Emre DANDIL

Engin GEDİK

Ercan GÜRSES

Erdem ÇİFTÇİ

Fuat KARA

Hakan KARADAĞ

Hüdayim BAŞAK

Kadir GÜÇLÜER

Kamil ŞİRİN

Kürşad SEZER

Mevlüt ERSOY

Muhammed ELİTAŞ

Murat GÖK

Murat KARAKUŞ

Mustafa KAYA

Nafiz YAŞAR

Oğuz YAYLA

Ömer MERCİMEK

Özgün YÜCEL

P. Merve KARABULUT

Sakine KIRATLI

Sinan AKSÖZ

Süleyman ULUDAĞ

Uğur ÖZDEMİR

Ümit YURT

Yusuf SÖNMEZ

İlker Ali ÖZKAN



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Gazi Journal of Engineering Sciences has been published three issues per year

CORRESPONDENCE ADDRESS :

Gazi Akademik Yayıncılık
Mustafa Kemal Mah. 2118 Cad. No:4C/140 Çankaya/Ankara
Tel: +90-312-9113311 Fax: +90-312-9113312
e-mail: editorgjes@gmail.com

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Evrişimsel Sinir Ağlarının Başarısının Artırılmasında Veri Arttırma Yöntemlerinin Etkisinin Ölçülmesi <i>Measuring the Effect of Data Augmentation Methods for Improving the Success of Convolutional Neural Network</i>	
Kürşad UÇAR, Hasan Erdinç KOÇER	430-438
Atık Döküm Kum Geri Kazanımı İle Silika Aerojel Sentezi ve Karakterizasyonu <i>Silica Aerogel Synthesis and Characterization by Waste Cast Sand Recovery</i>	
Tuba ARKAN, Hakan GOKMESE	439-446
Alev Gizleyen Tasarımlarının İç Akış Analizi ve Prototip İmalatı <i>Internal Flow Analysis and Prototype Manufacturing of Flash Hider Designs</i>	
Halil ÖZASLAN, Mustafa BOZDEMİR	447-456
Bina için Jiroskopik Titreşim Sönümleyici: Teorik ve Deneysel Araştırma <i>Gyroscopic Vibration Damper for One-Storey Building: Theoretical and Experimental Research</i>	
Faruk ÜNKER, Olkan ÇUVALCI	457-471
Kriyojenik İşlemin Sürtünme Karıştırma Kaynağı Üzerine Etkilerinin Araştırılması <i>Investigation of the Effects of Cryogenic Process on Friction Stir Welding</i>	
Onur ÖZBEK	472-479
Kazınmış Asfalt Atığı ve Cam Elyaf ile Üretilen Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması <i>Investigation of Physical and Mechanical Properties of Concrete Produced with Scraped Asphalt Waste and Glass Fiber</i>	
Turhan Can KARCI, Behcet DÜNDAR, Emriye CINAR RESULOGULLARI	480-490
EEG ve 2 Boyutlu Evrişimsel Sinir Ağları Aracılığıyla Otomatik Uyku Evre Tayini <i>Automatic Sleep Staging by EEG and 2D-Convolutional Neural Network</i>	
İbrahim KAYA	491-498
Atık Biyokütlenin Pirolizinden Hazırlanan Termal Modifiye Biyoçar Elektrotlar ile Elektro-Fenton Sisteminde Astrazon Blue Giderimi <i>Removal of Astrazon Blue in The Electro-Fenton System with Thermally Modified Biochar Electrodes Prepared from Pyrolysis of Waste Biomass</i>	
Başak Temur ERGAN, Ebubekir Sıddık AYDIN, Erhan GENGEÇ	499-510
Çeşitli Esnek Atalet Artırımı Mekanizmalarının Periyodik Titreşim Yalıtıcısı Tasarımına Yönelik Parametrik İncelemesi <i>A Parametric Investigation on Various Compliant Inertial Amplification Mechanisms for a Periodic Vibration Isolator Design</i>	
Enes ER, Erol TÜRKEŞ, Osman YÜKSEL	511-523
Çok Alanlı YTA'da Blok Zinciri Tabanlı Yönlendirme Üzerinden Yol Seçim Stratejilerinin Etki Analizi <i>Impact Analysis of Path Selection Strategies over Blockchain-based Routing in Multi-Domain SDN</i>	
Evrinm GÜLER	524-539

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Eklmeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Farklı Dolgu Yoğunluklarına Sahip Amorfl Termoplastik Numunelerin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation Of Tribological Properties of Amorphous Thermoplastic Samples With Different Filling Densities Produced By An Additive Manufacturing Method

Gülşah AKINCIOĞLU, Enes ASLAN.....540-546

Bir Uçak Kanadının Hücum Kenarına Kuş Çarpmasının Düzgün Parçacık Hidrodinamiği Yöntemiyle Sayısal İncelenmesi

Numerical Investigation of Bird Strike on an Aircraft Wing Leading Edge by Smooth Particle Hydrodynamics Method

M. Furkan SARIBAŞ, Sami KARADENİZ.....547-566

Yapay Zekâ Algoritmaları Kullanılarak Sesle Cinsiyet Tespiti

Gender Detection via Voice Using Artificial Intelligence Algorithms

Serkan GÖNEN, M. Ali BARIŞKAN, Gökçe KARACAYILMAZ, Birkan ALHAN, E. Nurcan YILMAZ, Harun ARTUNER.....567-575

34CrNiMo6 Malzemesine Uygulanan Sıcak Şekillendirme İşleminin Dislokasyon Yoğunluğuna Etkisi

Effect of Hot Forming Process on 34CrNiMo6 Material on Dislocation Density

Gözde ALTUNTAŞ, Bülent BOSTAN.....576-581

Türkiye'deki İllerde Bulunan Meskenlerin Enerji Verimliliği Etkinliği

Residences In Turkey's Provinces Energy Efficiency Event

Kübra Erdem ARSLAN, Adnan SÖZEN.....582-593

AISI 4140 İslah Çeliğinin Delinmesinde Yarıklı Talaş Açısının Etkisinin Deneysel ve Teorik Araştırılması

Experimental and Theoretical Investigation of the Effect of Gash Rake Angle on Drilling AISI 4140 Tempered Steel

Yafes CAVUS, Sukran KATMER, İsmail TEKAUT, Secil Kurt ARİFOĞLU, Harun GOKCE, Ulvi SEKER.....594-605

GAZİ JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Measuring the Effect of Data Augmentation Methods for Improving the Success of Convolutional Neural Network

Kürşad Uçar^a, Hasan Erdinç Koçer^b

Submitted: 07.06.2022 Revised: 17.08.2022 Accepted: 01.09.2022 doi:10.30855/gmbd.0705031

ABSTRACT

Keywords: Classification rate, Convolutional Neural Network, Data augmentation, Deep learning

^aSelcuk University, Technology Faculty, Dept. of Electric Electronic Engineering 42030 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0001-5521-2447
e mail: kucar@selcuk.edu.tr

^bSelcuk University, Technology Faculty, Dept. of Electric Electronic Engineering 42030 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0799-2140

*Corresponding author:
kucar@selcuk.edu.tr

With the intensive work done, deep learning finds many useful areas. However, obtaining a sufficient amount of data required by deep learning is not always an easy task. To overcome this difficulty, deep network trainers prefer to develop their datasets by using a set of algorithms. With the increased amount of data, deep networks can be trained more successfully. Data augmentation (DA) is one of the most widely used methods of increasing the amount of data. With DA, the number of sounds and images that a convolutional neural network (CNN) can classify can be increased. In this study, the number of images belonging to 6 classes that do not have enough images to train the CNN successfully enough was increased by DA methods. First, the amount of data was increased by applying three different DA methods separately and all three together. The original dataset and created datasets in which DA methods were used are used to train 15 CNNs with different parameters. Then, their effects on CNN have been investigated. As a result, a success increase of over 5% was observed by increasing the data.

Evrişimsel Sinir Ağlarının Başarısının Artırılmasında Veri Arttırma Yöntemlerinin Etkisinin Ölçülmesi

ÖZ

Yapılan yoğun çalışmalarla derin öğrenme birçok kullanım alanı bulmaktadır. Ancak derin öğrenmenin gerektirdiği yeterli miktarda veriyi elde etmek her zaman kolay bir iş değildir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için derin ağ eğiticileri, bir dizi algoritma kullanarak veri kümelerini geliştirmeyi tercih ederler. Artan veri miktarı ile derin ağlar daha başarılı bir şekilde eğitilebilir. Veri artırma (DA), veri miktarını artırmanın en yaygın kullanılan yöntemlerinden biridir. DA ile bir evrişimsel sinir ağının (CNN) sınıflandırabileceği ses ve görüntü sayısı artırılabilir. Bu çalışmada, CNN'yi yeterince başarılı bir şekilde eğitmek için yeterli görüntüye sahip olmayan 6 sınıfa ait görüntü sayısı DA yöntemleri ile artırılmıştır. İlk olarak, üç farklı DA yöntemi ayrı ayrı ve üçü birlikte uygulanarak veri miktarı artırılmıştır. DA yöntemlerinin kullanıldığı orijinal veri seti ve oluşturulan veri setleri, 15 CNN'yi farklı parametrelerle eğitmek için kullanılmıştır. Daha sonra CNN üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak veriler artırılarak %5'in üzerinde bir başarı artışı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sınıflandırma oranı, Evrişimli Sinir Ağı, Veri arttırma, Derin öğrenme

1. Introduction

Today, machines can easily and quickly perform quite different tasks, such as disease detection [1], object separation [2], face recognition [3], and ripe fruit detection [4]. Machine learning and deep learning algorithms have a large share for the machines reaching this stage. Compared to machine learning, deep learning has made a breakthrough in the solution of classification problems with its emergence [5]. Especially in image classification and pattern recognition areas, the superior success of convolutional neural networks (CNNs) compared to classical methods is seen [6]. Deep learning makes it possible to work with a large amount of data compared to machine learning and classify it with higher accuracy. For this reason, it is a known fact that deep learning algorithms give better results if they have more data that can be classified [7], [8]. To increase deep learning performance, many different data are needed [9]–[12]. However, as it is not easy to overcome this difficulty, sufficient data cannot be obtained to train the classifiers [13]. Especially in fields such as military and medical imaging, it is not possible to obtain sufficient data due to reasons such as protocol and confidentiality [14]. In addition, even if it is desired to increase the amount of data through data collection, it may not always be possible to meet this need because the collected data will start to look similar to each other. At the same time, collecting large amounts of data and labeling them are both tedious and time-consuming. For this reason, data replication or data augmentation (DA) [15], [16] is preferred in classification applications with deep networks where data deficiency is encountered. DA is the process of obtaining new data with some transformations while preserving the labels of existing data [15]. In [17], since the images were destroyed in the pre-processing before CNN processing, the decrease in the dataset was eliminated with the images produced with the Generative adversarial network (GAN). Similarly, synthetic data was produced by using DA methods to alleviate the class imbalance in [18]. Since DA has many options and variables, it is important to choose the right method or approach. For this purpose, which DA method is more suitable for the dataset was investigated in [19]. Otherwise, it will cause the classifier to misclassify or delay the training process due to the data that does not affect it. Even data with little or no effect on the classifier increase the training period and are generally harmful to the user. Another effect of DA on CNN classification is that it improves generalization performance [7], [20], [21]. Thus, overfitting, which is one of the main problems of artificial intelligence applications, is prevented. With generalization, the classification success of the deep network is valid not only for training and test data but also for data that it has never seen.

In this paper, the effect of different DA approaches on deep learning is examined. First, three datasets were created by applying the traditional DA methods: shifting, rotating, and flipping separately. Then, by applying these three methods together, another dataset was obtained. The fifth dataset was created by cleaning the erroneous images that occurred while applying DA. The 15 created deep networks with different parameters were trained and tested with the original dataset and the datasets produced with DA. Thus, by comparing DA methods, we showed that DA increases the success of CNN. In addition, the erroneous images that occurred while applying DA were removed from the dataset, and the effect of this was demonstrated.

The organization of the rest of the paper is as follows. In Section 2, information about the CNNs and DA methods used is given. The created datasets are explained in Section 3. Experiments and results are presented in Section 4. Finally, in the last section, the work is concluded.

2. Material Method

2.1. Structures of convolutional neural networks

Since CNNs are similar to animal systems in terms of topology, the studies of speech and image classifiers have intensified. One of the reasons why CNN is preferred so much is that it does not need a feature extraction step on the raw data to achieve high accuracy. Thus, it is possible to work on raw images. However, since each neuron is linked with all the pixels of the image, it requires high memory and processing power. Spatial stability in the image is obtained by shared weights [22].

Subsampling, which is a stage of CNNs, is an important method in object recognition, as it helps to achieve invariance against image disorders. Local connections on neurons in sequential layers take advantage of spatial dependencies on the image [23]. Connections between layers, convolutional

layers, and pooling are the basic building blocks of the CNN architecture. Properties at each position in the input matrix are determined by filters in the convolution layer [24]. By pooling, the dimensions of the features obtained with the convolution layer are reduced. Thus, the calculation speed is increased, and the possibility of overfitting is reduced [25]. Maximum pooling divides the image into rectangles that do not overlap the others and gives the maximum value within the rectangles. Thus, it helps to reduce the amount of data that needs to be worked by reducing the size of the image. Feature maps are created by applying the convolution process to the image. The number of filters used determines the number of feature maps created.

CNNs with different structures were trained to see the effect of the different DA approaches. CNNs with 2, 3, and 4 convolution layers are used. In addition, the performances were examined by changing the filter numbers that affect the performance of the CNN. 3x3 kernel size filters are used in the convolution layers. The CNNs used are shown in Fig 1. In each structure, 2x2 max pooling was applied after the first and second convolution layers. After the third and fourth convolution layers, no pooling was applied. At the end of the convolution layers, there is a fully connected layer with 128 nodes. The output layer consists of 6 nodes.

The numbers of filters on the CNN with two convolution layers are 32-32, 64-64, 32-64, 64-96, and 32-96. The numbers of filters in the CNN with three convolution layers are 32-32-32, 64-64-64, 16-32-64, 32-64-96, and 64-96-96. The numbers of filters in the CNN with four convolution layers are 32-32-32-32, 64-64-64-64, 32-32-64-64, 16-32-64-96, and 32-48-64-96.

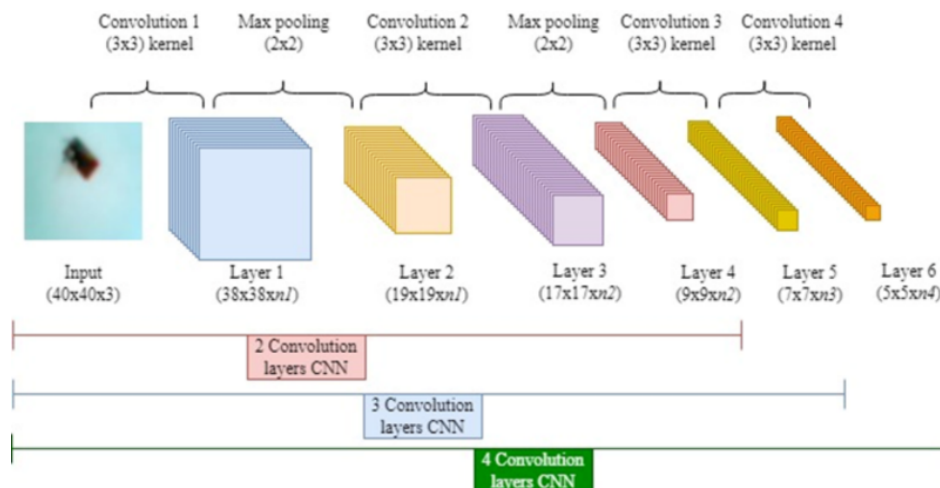


Figure 1. 2, 3, and 4 convolution layers CNN architectures ($n1, n2, n3, n4$ are filter numbers)

2.2. Data augmentation

DA means creating new datasets by modifying the original datasets. Synthetic copies are created after processing with various techniques. For images, the amount of data is increased by methods such as flipping, rotation, cropping, shifting, and color tone changes. The other DA methods are used: frequency masking and scaling for sounds, replacement with synonyms for texts, random word deletion, etc. In this study, new datasets were created by applying shifting, flipping, and rotating these among the DA methods.

3. Dataset

The created dataset consists of 6 classes. Classes consist of hand tools, tape, electronic cards, lego, battery, and plant leaves.

Hand Tool: Clamping hand tools of the gripper type constitute this class. They are images of tools such as pliers and side cutters of different sizes and colors.

Tape: Tape images were created using different tape types, such as isolated, double-sided, and duct tape. The classification was made on the circular shapes of the tapes.

Electronic Card: Electronic cards belonging to different electrical circuits were used. As the circuits on them were different, electronic cards with different elements and sizes were used. Some cards also had connection cables. Images of the cards were taken from the surface where only the circuit elements are

seen.

Lego: Random shapes were created using legos as a child's toy. Four different colors were used: yellow, red, blue, and green. The lego class was created with the images taken by creating different combinations in both shape and color.

Table 1. Dataset labels and training-testing image numbers

DA methods	Dataset label	Number of images		
		Train	Val.	Test
-	Dataset1	3360	720	720
Only flipping	Dataset2	11760	2520	2520
Only rotating	Dataset3	11760	2520	2520
Only shifting	Dataset4	11760	2520	2520
Flipping, rotating, and shifting	Dataset5	11760	2520	2520
Flipping, rotating, and shifting (cleared)	Dataset6	11760	2520	2520

Battery: This class consists of images of pen and square batteries belonging to different brands.

Leaf: The leaf was created by viewing the dried leaves of the plane tree. The sizes of the leaves can be different as well as their openings. In addition, some torn leaves were also used.

The elements of the classes were displayed randomly, not in a fixed position and angle, as seen in the sample images given in Fig 2. A total of 4800 images were taken, with 800 images originating from each class. The images taken have 40x40x3 dimensions. No special lighting was used for the images, but they were taken under normal room conditions with sunlight. Images were taken at different hours with different light intensities during the day. Objects placed on a white surface were imaged with a fixed distance camera.

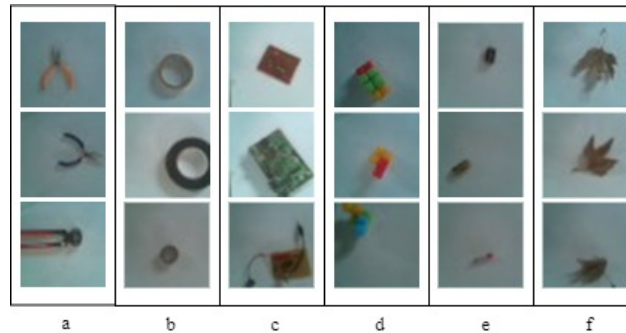


Figure 2. Original dataset, a) hand tools, b) tape, c) electronic card, d) lego, e) battery, and f) leaf.

DA methods were applied to each image randomly. Since randomness was the foremost factor in obtaining the original images, rotation, horizontal shifting, vertical shifting, and flipping processes were also applied to each image randomly to increase the amount of data. To create the augmented data, we employed the following combinations of DA methods to the images:

- only rotating,
- only horizontal and - or vertical shifting,
- only flipping horizontally and - or vertical flipping,
- rotating, shifting, and flipping.

Thus, four separate datasets were prepared, including 2800 images from each class.

Two problems arise with the process of filling the empty regions when creating new images from the images of objects that are beyond or close to the borders of the image. Due to these problems, after the DA methods were applied, some distorted images that do not resemble the real image as in Fig 3 were also formed. The first problem arises if part of the object is beyond the boundaries of the image and the image is shifted or rotated from the side where the object is located to the other side. The filling process is in the color of the object since the regions where no value is assigned by shifting and rotating will be filled with the boundaries of the object. Thus, an image different from the background is created in the border region where the object is located. This problem causes the object to appear as it is not actually. Fig 3(a) and (b) show the distorted samples caused by the filling in the image after the rotation and shifting process, respectively. The second problem is the disappearance of objects completely or partly. This problem also arises when shifting or rotating is done toward the edge where the object is located (Fig 3(c)). Since the images created with such problems will not be healthy for the datasets, they have

been removed from the datasets. Another dataset was created with the remaining images after the distorted images were eliminated. New images were produced to replace the deleted images.

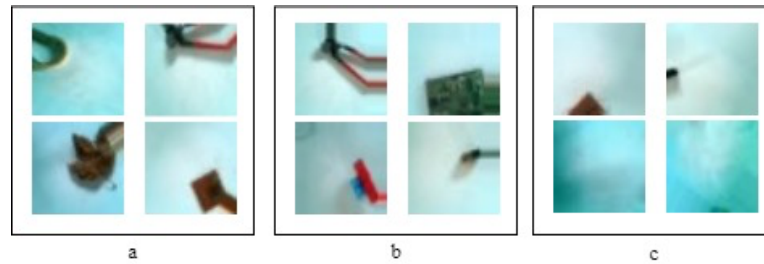


Figure 3. a) Distorted images that occur during the rotation process, b) incorrect images that occur during the shifting process, c) images in which all or some object parts are missing

4. Experiments and Result

Since the study was conducted to show the effect of DA on classification, CNNs with the same parameters were trained and tested with original and increased data. Using the original images, 560 of the 800 images in each class were used for training, while the test and validation data consist of 120 images separately. In the created dataset, 1960 of 2800 images from each class were used for training, and 420 images were used for testing and validation.

Table 1 shows the datasets created and the total number of images in the training, validation, and testing processes. In addition, for the rest of the article, instead of naming the datasets with the related DA methods, they were used with given labels.

CNNs created for the study have three different numbers of convolution layers: 2, 3, and 4. The best result is obtained by trying 5 different combinations of filter numbers in each CNN layer. In all CNNs, the number of nodes in the fully connected layer is 128. As a result, a total of 15 different CNNs were trained and tested with 6 datasets. Each CNN's input is 40x40x3, which is the original size of the images. In Table 2, Table 3, and Table 4, the training and testing accuracy rates of CNNs with two, three, and four convolution layers for each dataset are presented as percentages, respectively. The results are given by choosing the highest test accuracy out of 30 epochs.

Table 2. Train-test accuracies of CNNs with two convolution layers.

Number of filters	32-32		32-64		64-64		64-96		32-96	
	Val.	Test	Val.	Test	Val.	Test	Val.	Test	Val.	Test
Dataset1	84.32	86.39	84.26	84.31	86.67	87.22	85.69	87.92	84.44	88.06
Dataset2	92.58	91.15	95.44	95.32	93.29	93.10	92.98	93.02	93.02	93.21
Dataset3	94.60	93.85	94.84	94.92	94.56	94.21	95.28	95.08	95.36	95.71
Dataset4	90.00	88.14	93.85	93.85	92.50	92.82	93.02	92.30	92.50	93.81
Dataset5	87.54	89.13	88.10	89.13	89.01	90.08	89.05	91.11	88.89	91.03
Dataset6	92.90	92.86	92.38	94.84	92.09	94.09	93.02	94.29	93.17	93.97

Table 3. Train -test accuracies of CNNs with three convolution layers.

Number of filters	32-32-32		64-64-64		16-32-64		32-64-96		64-96-96	
	Val.	Test	Val.	Test	Val.	Test	Val.	Test	Val.	Test
Dataset1	85.42	87.36	89.17	90.28	84.89	85.42	87.36	89.17	90.28	84.89
Dataset2	93.65	94.56	95.99	96.47	94.92	93.65	94.56	95.99	96.47	94.92
Dataset3	96.98	96.51	97.98	97.26	95.08	96.98	96.51	97.98	97.26	95.08
Dataset4	95.24	96.58	96.35	97.06	95.75	95.24	96.58	96.35	97.06	95.75
Dataset5	91.59	93.37	93.65	95.60	89.33	91.59	93.37	93.65	95.60	89.33
Dataset6	95.48	95.99	96.19	97.18	95.00	95.48	95.99	96.19	97.18	95.00

The best result was obtained in Dataset3 in 2 convolution layer CNNs. In general, the highest success was achieved with CNN, whose filter numbers were 32 and 96, respectively. In Table 3, it is seen that the best high accuracy rates are achieved in CNNs with the highest number of filters. It is seen that the accuracy rates are higher for each dataset according to two convolution layer CNN. In four convolution layer CNNs, the highest accuracy rate for all datasets was achieved with two combinations. The train's success has exceeded 99%.

In Table 5, in order to see the effects of the number of convolutional layers and filters on CNN on classification, the average of the accuracy rates of all datasets for each CNN is presented.

Table 4. Train -test accuracies of CNNs with four convolution layers.

Number of filters	32-32-32-32		64-64-64-64		32-32-64-64		16-32-64-96		32-48-64-96	
	Val.	Test	Val.	Test	Val.	Test	Val.	Test	Val.	Test
Dataset1	86.25	88.89	90.56	92.50	90.28	86.25	88.89	90.56	92.50	90.28
Dataset2	94.92	95.68	97.86	97.46	96.94	94.92	95.68	97.86	97.46	96.94
Dataset3	96.75	97.22	98.02	97.26	97.86	96.75	97.22	98.02	97.26	97.86
Dataset4	96.31	96.59	97.54	97.98	96.59	96.31	96.59	97.54	97.98	96.59
Dataset5	92.22	92.42	95.71	95.71	94.05	92.22	92.42	95.71	95.71	94.05
Dataset6	95.83	96.83	96.51	96.51	95.91	95.83	96.83	96.51	96.51	95.91

In order to summarize the results of 15 CNNs that were trained and tested according to their datasets, the average of accuracy rates of all CNNs for each dataset is given in Table 6.

As it can be clearly understood from the tables above, higher training and test accuracy rates can be achieved by reproducing data with data enhancement methods. It was observed that datasets created using only one type of DA method (rotation, shifting, or flipping) gave better results in CNN training and testing compared to the combination of three types of DA (rotation + flipping + shifting) method. Considering the experimental results of the study, the highest test accuracy rate was reached in the increased dataset by using the rotation alone. When only one DA method is compared, it is seen that shifting has the lowest accuracy rate. This is because the shifting process distorts the image.

In the last two lines of Table 2-4, the effect of distorted images in data enhancement methods can be seen. Although there are fewer images in Dataset6, it gives results close to Dataset5. In two convolution layer CNNs, the cleaned dataset has a lower accuracy than the uncleaned dataset. This situation reverses as the number of convolution layers increases. While CNNs with 3 convolution layers have reached similar accuracy rates for the mentioned datasets, the cleaned dataset gives better results in 4 convolution layer CNNs. However, even the dataset with distorted images reached higher accuracy than the original dataset.

When the maximum and average test accuracy rates presented in Table 6 are examined, it is seen that the accuracy rate of the original dataset with a lower number of images varies more depending on the CNN structure. This leads to the necessity of choosing the appropriate CNN structure for datasets with low visibility. Although there are distorted images due to rotation in Dataset3, it generally has better classification success than Dataset2. The reason for this is that it is possible to create images different from the original with the rotation process. Thus, the distinctiveness of classes increases.

Table 5. Average accuracy rates of all datasets for each CNN

2 convolution Layers		3 convolution layers		4 convolution layers	
Number of filters	Test	Number of filters	Test	Number of filters	Test
32-32	90.25	32-32-32	94.06	32-32-32-32	94.60
32-64	92.06	64-64-64	95.64	64-64-64-64	96.61
64-64	91.92	16-32-64	93.23	32-32-64-64	95.77
64-96	92.29	32-64-96	96.24	16-32-64-96	94.75
32-64	92.63	64-96-96	96.35	32-48-64-96	96.16

Table 6. Averages and maximum accuracy rate for each dataset

Dataset	Average Accuracy for 15 CNNs		Max. Accuracy for 15 CNNs	
	Test	Test	Number of convolution layer	Number of filter
Dataset1	88.55	92.50	4	64-64-64-64
Dataset2	95.29	97.46	4	64-64-64-64
Dataset3	96.32	98.21	3	64-96-96
Dataset4	95.58	98.25	4	32-48-64-96
Dataset5	93.49	97.30	4	64-64-64-64
Dataset6	95.79	97.42	4	32-48-64-96

It is understood from Table 5 that as the number of convolution layers and filters in the CNN structure increases, CNN performance increases.

Table 7. The confusion matrices

Dataset		Confusion matrix					
Classes		Hand tools	Tape	Electronic card	Lego	Battery	Leaf
Dataset1	Hand tools	0.9547	0.0044	0.0100	0.0056	0.0228	0.0006
	Tape	0.0095	0.8983	0.0206	0.0006	0.0644	0.0167
	Electronic card	0.0044	0.0150	0.8389	0.0028	0.0550	0.0839
	Lego	0.0394	0.0261	0.0167	0.8500	0.0678	0.0000
	Battery	0.0033	0.0806	0.0244	0.0033	0.8817	0.0067
	Leaf	0.0017	0.0156	0.0956	0.0000	0.0000	0.8872
Dataset2	Hand tools	0.9857	0.0052	0.0017	0.0013	0.0060	0.0000
	Tape	0.0027	0.9541	0.0027	0.0000	0.0365	0.0040
	Electronic card	0.0017	0.0268	0.8863	0.0000	0.0348	0.0503
	Lego	0.0040	0.0044	0.0003	0.9817	0.0095	0.0000
	Battery	0.0014	0.0400	0.0122	0.0002	0.9449	0.0013
	Leaf	0.0002	0.0135	0.0186	0.0000	0.0033	0.9644
Dataset3	Hand tools	0.9779	0.0044	0.0014	0.017	0.0144	0.0000
	Tape	0.0019	0.9424	0.0040	0.0006	0.0487	0.0024
	Electronic card	0.0008	0.0097	0.9195	0.0000	0.0379	0.0321
	Lego	0.0011	0.0027	0.0006	0.9881	0.0075	0.0000
	Battery	0.0005	0.0217	0.0035	0.0002	0.9738	0.0003
	Leaf	0.0002	0.0167	0.0154	0.0000	0.0051	0.9627
Dataset4	Hand tools	0.9859	0.0027	0.0014	0.0000	0.0098	0.0002
	Tape	0.0016	0.9283	0.0033	0.0000	0.0625	0.0043
	Electronic card	0.0008	0.0125	0.8967	0.0000	0.0360	0.0540
	Lego	0.0046	0.0005	0.0002	0.9868	0.0079	0.0000
	Battery	0.0032	0.0219	0.0040	0.0003	0.9690	0.0016
	Leaf	0.0003	0.0121	0.0156	0.0000	0.0040	0.9681
Dataset5	Hand tools	0.9797	0.0065	0.0013	0.0019	0.0100	0.0006
	Tape	0.0041	0.8922	0.0067	0.0013	0.0895	0.0062
	Electronic card	0.0016	0.0244	0.8602	0.0000	0.0563	0.0575
	Lego	0.0019	0.0014	0.0003	0.9889	0.0075	0.0000
	Battery	0.0040	0.0425	0.0187	0.0022	0.9316	0.0010
	Leaf	0.0003	0.0171	0.0227	0.0000	0.0032	0.9567
Dataset6	Hand tools	0.9894	0.0016	0.0013	0.0041	0.0037	0.0000
	Tape	0.0073	0.9505	0.0056	0.0011	0.0256	0.0100
	Electronic card	0.0021	0.0100	0.9051	0.0003	0.0484	0.0341
	Lego	0.0010	0.0000	0.0000	0.9963	0.0027	0.0000
	Battery	0.0043	0.0316	0.0183	0.0038	0.9417	0.0003
	Leaf	0.0003	0.0087	0.0248	0.0000	0.0016	0.9646

Confusion matrices were also used to see the classification success of each class. In the study, instead of showing 90 different confusion matrices, it was preferred to show the confusion matrices belonging to each dataset. While calculating these matrices, the results of 15 CNNs tested with a dataset were collected and normalized. Confusion matrices of datasets are shown in Table 7. The most successfully classified class is the lego class. The battery class stands out as the class with the lowest classification success. The most successful classification in Dataset1 belongs to legos. Outside of legos, the highest rate belongs to leaves with 0.8819. As can be understood from here, Dataset1 is not considered very successful in terms of classification. It is seen that the battery class has the lowest classification success. With the data increase in Dataset2, the success of the classification also emerges. The success difference between the battery class with other classes has been closed with the lowest classification success in Dataset1. In general, the highest classification belongs to Dataset3. In fact, the lego class was predicted at 99.93% correctly in Dataset3. Although there are also distorted images in Dataset3 and Dataset4, higher accuracy was achieved with only the rotation process. With the application of more DA in

Dataset5, the classification success is lower than Dataset2, Dataset3, and Dataset4. In addition, Dataset5 has the lowest lego class classification success at 98.78% among all datasets. When confusion matrixes of Dataset5 and Dataset6 are compared, it is seen that cleaning contributes positively to the classification rate of hand tool, lego, and battery classes, where the average accuracy of Dataset6 is lower than Dataset5's.

5. Conclusion

In this study, the effect of DA methods on the success of deep learning was investigated. In this context, 3 different DA methods were applied to images belonging to 6 different classes. Raw data and datasets created by DA methods were separately trained on CNN. In order to see the effect of DA independently from the CNN structure, training and testing procedures were carried out with 15 different CNN structures. When all test results are examined, it is clearly seen that; a higher classification success was achieved with the datasets created with DA compared to the raw datasets. Even with unreal images created due to DA methods, higher success has been achieved than raw data. Thus, the data which does not sufficient for CNN to reach a high accuracy rate was expanded with the DA method, allowing CNN to reach a higher classification rate.

Acknowledgment

This research is supported in part by Selçuk University Coordinatorship of Faculty Member Training Program via grant number 2019 - ÖYP - 008.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] M. Ouhami, A. Hafiane, Y. Es-Saady, M. El Hajji, and R. Canals, "Computer vision, IoT and data fusion for crop disease detection using machine learning: A survey and ongoing research," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 13, p. 2486, 2021. doi:10.3390/rs13132486
- [2] Ö. Şengül, S. Öztürk, and M. Kuncan, "Color based object separation in conveyor belt using PLC," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 18, pp. 401–412, 2020. doi:10.31590/ejosat.685936
- [3] F. Tabassum, M. I. Islam, R. T. Khan, and M. R. Amin, "Human face recognition with combination of DWT and machine learning," *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2020. doi:10.1016/j.jksuci.2020.02.002
- [4] A. D. M. Africa, A. R. V. Tabalan, and M. A. A. Tan, "Ripe fruit detection and classification using machine learning," *Int J*, vol. 8, no. 5, 2020. doi:10.30534/ijeter/2020/60852020
- [5] Y. Q. Lv, K. Liu, F. Cheng, and W. Li, "Visual tracking with tree-structured appearance model for online learning," *IET Image Processing*, vol. 13, no. 12, pp. 2106–2115, 2019. doi:10.1049/iet-ipr.2018.6517
- [6] F. Özyurt, T. Tuncer, E. Avcı, M. Koç, and İ. Serhatlioğlu, "A novel liver image classification method using perceptual hash-based convolutional neural network," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, no. 4, pp. 3173–3182, 2019. doi:10.1007/s13369-018-3454-1
- [7] L. Nanni, M. Paci, S. Brahmam, and A. Lumini, "Comparison of different image data augmentation approaches," *Journal of Imaging*, vol. 7, no. 12, p. 254, 2021. doi:10.3390/jimaging7120254
- [8] L. Perez and J. Wang, "The effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning," *arXiv preprint arXiv:1712.04621*, 2017. doi:10.48550/arXiv.1712.04621
- [9] Q. Lin *et al.*, "Classifying functional nuclear images with convolutional neural networks: a survey," *IET Image Processing*, vol. 14, no. 14, pp. 3300–3313, 2020. doi:10.1049/iet-ipr.2019.1690
- [10] H. Alhichri, Y. Bazi, and N. Alajlan, "Assisting the Visually Impaired in Multi-object Scene Description Using OWA-Based Fusion of CNN Models," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, no. 12, pp. 10511–10527, 2020. doi:10.1007/s13369-020-04799-7
- [11] A. Khémiri, A. K. Echi, and M. Elloumi, "Bayesian versus convolutional networks for Arabic handwriting recognition," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, no. 11, pp. 9301–9319, 2019. doi:10.1007/s13369-019-03939-y
- [12] F. Zhou, Y. Hu, and X. Shen, "MSANet: multimodal self-augmentation and adversarial network for RGB-D object recognition," *The Visual Computer*, vol. 35, no. 11, pp. 1583–1594, 2019. doi:10.1007/s00371-018-1559-x

- [13] A. Fawzi, H. Samulowitz, D. Turaga, and P. Frossard, "Adaptive data augmentation for image classification," in *2016 IEEE international conference on image processing (ICIP)*, 2016, pp. 3688–3692.
- [14] R. Hao, K. Namdar, L. Liu, M. A. Haider, and F. Khalvati, "A comprehensive study of data augmentation strategies for prostate cancer detection in diffusion-weighted MRI using convolutional neural networks," *Journal of Digital Imaging*, vol. 34, no. 4, pp. 862–876, 2021. doi:10.1007/s10278-021-00478-7
- [15] D. A. Van Dyk and X.-L. Meng, "The art of data augmentation," *Journal of Computational and Graphical Statistics*, vol. 10, no. 1, pp. 1–50, 2001. doi:10.1198/10618600152418584
- [16] C. Shorten and T. M. Khoshgoftaar, "A survey on image data augmentation for deep learning," *Journal of Big Data*, vol. 6, no. 1, pp. 1–48, 2019. doi:10.1186/s40537-019-0197-0
- [17] V. Kukreja, D. Kumar, and A. Kaur, "GAN-based synthetic data augmentation for increased CNN performance in Vehicle Number Plate Recognition," in *2020 4th international conference on electronics, communication and aerospace technology (ICECA)*, 2020, pp. 1190–1195.
- [18] H. Lee, H. Lee, H. Hong, H. Bae, J. S. Lim, and J. Kim, "Classification of focal liver lesions in CT images using convolutional neural networks with lesion information augmented patches and synthetic data augmentation," *Medical physics*, vol. 48, no. 9, pp. 5029–5046, 2021. doi:10.1002/mp.15118
- [19] L. Taylor and G. Nitschke, "Improving deep learning with generic data augmentation," in *2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 2018, pp. 1542–1547. doi:10.1109/SSCI.2018.8628742
- [20] P. M. Blok, F. K. van Evert, A. P. M. Tielen, E. J. van Henten, and G. Kootstra, "The effect of data augmentation and network simplification on the image-based detection of broccoli heads with Mask R-CNN," *Journal of Field Robotics*, vol. 38, no. 1, pp. 85–104, 2021. doi:10.1002/rob.21975
- [21] M. M. A. Monshi, J. Poon, V. Chung, and F. M. Monshi, "CovidXrayNet: Optimizing data augmentation and CNN hyperparameters for improved COVID-19 detection from CXR," *Computers in biology and medicine*, vol. 133, p. 104375, 2021. doi:10.1016/j.combiomed.2021.104375
- [22] Y. LeCun *et al.*, "Handwritten digit recognition with a back-propagation network," *Advances in neural information processing systems*, vol. 2, 1989.
- [23] C. Affonso, A. L. D. Rossi, F. H. A. Vieira, and A. C. P. de Leon Ferreira, "Deep learning for biological image classification," *Expert Systems with Applications*, vol. 85, pp. 114–122, 2017. doi:10.1016/j.eswa.2017.05.039
- [24] A. Arora, P. Chakraborty, and M. P. S. Bhatia, "Analysis of Data from Wearable Sensors for Sleep Quality Estimation and Prediction Using Deep Learning," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, no. 12, pp. 10793–10812, 2020. doi:10.1007/s13369-020-04877-w
- [25] X. Jiang, S. C. Satapathy, L. Yang, S.-H. Wang, and Y.-D. Zhang, "A Survey on Artificial Intelligence in Chinese Sign Language Recognition," *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 1–36, 2020. doi:10.1007/s13369-020-04758-2

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Silica Aerogel Synthesis and Characterization by Waste Cast Sand Recovery

Tuba Arkan^a, Hakan Gokmese^b

Submitted: 30.05.2022 Revised: 14.06.2022 Accepted: 08.11.2022 doi:10.30855/gmbd.0705032

ABSTRACT

In this work, waste casting sand obtained from Seydişehir Eti Aluminum plants was used as starting material. Silica aerogel was produced by sol-gel method over this supplied material. As the beginning of the studies, XRD and XRF analyzes were performed on the waste casting sand, respectively. Thus, the chemical compositions of the starting materials were determined. Following the analysis studies, sodium silicate solution was obtained from the waste foundry sand. Then, five different pH values (2, 4, 6, 8 and 9) were applied for the synthesis studies of silica aerogel. Finally, the appropriate pH value was determined and silica aerogel modification (Superhydrophobic) was carried out. Characterization studies, respectively, density measurements, FT-IR analysis, contact angle measurement and SEM examinations were carried out on the synthesized silica aerogel material. As a result of applied different pH values and experiments, the formation of silica aerogel content with the lowest density with pH 8 value was determined.

Atık Döküm Kum Geri Kazanımı İle Silika Aerojel Sentezi ve Karakterizasyonu

ÖZ

Bu çalışmada Seydişehir Eti Alüminyum tesislerinden temin edilen atık dökümü kumu, başlangıç malzemesi olarak kullanılmıştır. Tedarik edilen bu malzeme üzerinden sol-jel yöntemi ile silika aerojel sentezi gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların başlangıcında atık döküm kumuna sırasıyla XRD ve XRF analizleri yapılmıştır. Böylelikle başlangıç malzeme kimyasal bileşimleri tespit edilmiştir. Analiz çalışmalarını takiben atık döküm kumundan sodyum silikat çözeltisi elde edilmiştir. Daha sonra silika aerojel sentezleme çalışmaları için beş farklı pH değeri (2, 4, 6, 8 ve 9) uygulanmıştır. Son olarak uygun pH değeri belirlenerek silika aerojel modifikasyonu (Süperhidrofobik) gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen silika aerojel malzemede sırasıyla yoğunluk ölçümleri, FT-IR analizi, temas açısı ölçümü ve SEM incelemeleri olmak üzere karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Uygulanan farklı pH değer ve deneyleri neticesinde, pH 8 değeri ile yoğunluğu en düşük silika aerojel içeriği oluşumu tespit edilmiştir.

Keywords: Waste casting sand,
Sol- gel, Silica aerogel

^{a*} Kto Karatay University,
Fine Arts and Desing Faculty,
Dept. of Interior Architecture
42040-Karatay- Konya,
Türkiye
Orcid: 0000-0003-3278-9045
e mail: tuba_arkan@hotmail.com

^b Necmettin Erbakan University,
Seydisehir Ahmet Cengiz
Faculty of Engineering,
Dept. of MechanicalEngineering
42370-Seydisehir-Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0053-8444

*Corresponding author:
tuba_arkan@hotmail.com

Anahtar Kelimeler: Atık döküm kumu,
Sol-jel, Silika aerojel

1. Giriş (Introduction)

Son zamanlarda özellikle hafifliği ile öne çıkan aerojeller, alkojel adı verilen silika ve etanol içerikli sıvı çözücünden oluşan jelin kurutulularak katı silika bileşeninden sıvının ayrıştırılması işlemiyle üretilmektedir. Bu malzemenin yüzeyleri çok sayıda deliklerden oluşmaktadır. Bu deliklerin büyüklüğü milimetrenin milyarda biri kadardır ve delikler malzemeyi bir ağ gibi çevrelemektedir. Aerojellerin kırılğan bir yapıya sahip olduğu bilinmekte ve bu olumsuz özelliği teknolojik ilerlemeler sonrası giderilmiştir. Aerojellerin yapısının büyük çoğunluğu havadan oluşmaktadır. Bu özellik aerojellerin hafif ve şeffaf bir malzeme olmasını sağlamaktadır [1]. Günümüz teknolojisinde aerojeller; uzay ve havacılıkta ısı yalıtımı, akustik yalıtım, bina, katalizör, endüstriyel alanlar, yakıt hücreleri, spor ekipmanları, tekstil ve kimyasal sensör gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Aerojeller birçok farklı formda yer alabilmektedir. Bunlar sırasıyla granül, monolit, levha ve keçe gibi belirtilebilir. Aerojel granülleri ve monolitler sol-jel yöntemiyle sentezlenirken, aerojel keçe ve levhalar fiber, parçacık ve opaklaştırıcıların takviyesi ile üretilir. Granül ve monolit aerojelin kırılğan yapısı nedeniyle, uygulama alanı sınırlıdır. Kırılğanlığı azaltıp, mekanik bütünlüğü iyileştirmek için, aerojeller genellikle destekleyici fiber yapılarla güçlendirilir ve bu nedenle esnek ısı yalıtım keçeleri olarak kullanılabilir [2].

Çoğunlukla karşımıza çıkan silika aerojeller, kendine özgü gözenek yapısı ile hidrolik aktive göstermemekle birlikte yüksek miktardaki hava boşluklarına rağmen katı iskelet yapılarını muhafaza edecek şekilde üretilmektedir. Bu malzeme son zamanlarda dünyada en hafif malzeme türü olarak aday potansiyeli oluşturmaktadır. Özellikle çimento içerikli bileşimlerde kullanılması giderek ön plana çıkmaktadır. Böylelikle bu malzemelerin kullanıldığı çalışmalar, termal veya akustik yalıtım performanslarının iyileştirilmesi odaklı olabilmektedir. Bilhassa silika aerojeller %99.8 gibi yüksek gözenek hacmine sahip olmalarının yanı sıra kendi ağırlıklarının neredeyse 1600 katı kadar yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Parçacık yoğunlukları dikkate alındığında, hava parçacıklarına nazaran 4 -5 kat daha yüksek olduğu bilinmektedir. Alkali- aktive edilmiş harç uygulamalarında silika aerojellerin düşük takviye içeriklerinde kullanımına yönelik yapılan çalışmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle eşit aktivatör oranı için uygulanan karışımlarda uygun seviyelerde artan aerojel içeriği sonrası az da olsa dayanım değerinde bir artış oluşturduğu görülmektedir [3,4]. Silika aerojeller, ilk kez 1930' lu yıllarda S. Kistler tarafından üretilmiştir. İlk zamanlarda otomotiv, elektronik, giyim, kimya gibi farklı uygulama alanlarında kullanılmışlardır. Ancak sonraki dönemlerde yüksek miktardaki yalıtım özellikleri sebebiyle çimento içerikli yapı malzemelerinin üretiminde çoğunlukla uygulama bulmuştur. Silika aerojeller, 500-1200 m² /g yüksek yüzey alanları, 0.003 g/cm³ düşük yoğunlukları, %99.8' varan yüksek poroziteleri ve 0.005 W/(m.K) gibi oldukça düşük termal iletkenlik katsayıları ile dünyanın en hafif katısı olarak tanımlanabilmektedir [5]. Silika aerojeller basit, ekonomik ve etkili bir yöntem olarak bilinen sol-jel yöntemi ile elde edilebilmektedir. Bu yöntem çözelti oluşturma ve jelleşme, yaşlandırma, kurutma, yoğunlaştırma olmak üzere 4 basamakta gerçekleştirilmektedir [6]. Silika aerojeller sentez sırasındaki koşullara bağlı olarak hidrofilik (su sevmeme) veya hidrofobik (su sevmeme) olabilirler. Malzemenin hidrofobikliği temas açısına bakılarak ölçülmektedir. Temas açısı 90°den küçük olan yüzeyler hidrofildir, su yüzeyde yayılım gösterir. Temas açısı 90° ile 150° arasında olan yüzeyler hidrofobiktir, su yüzeyde damlacık halinde kalır, yayılım göstermez. Temas açısı 150°den büyük olan yüzeylerse süper hidrofobiktir. Hidrofobiklik özelliği; silika aerojelin nemli ve ıslak ortamlardaki suyu iterek korumaktadır [7].

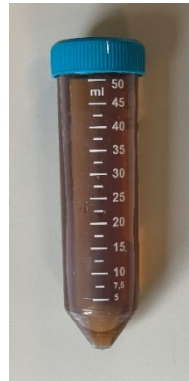
Ülkemizde yer alan döküm sektörünün zenginliği, Türkiye'nin metal döküm üretiminde dünya çapında oldukça büyük önem arz etmektedir. 1 ton döküm için yaklaşık 4 - 5 ton döküm kumu gerekmektedir ve sisteme eklenen döküm kumu tekrar değerlendirilerek silis kaynağı olarak kullanılmaktadır [8]. Döküm işleminden sonra oluşan atık döküm kumlarının miktarındaki artışlar, atık döküm kumlarının yeniden kullanılması konusunda yeni araştırmalar yapmaya yöneltmiştir [9]. Bu çerçevede döküm teknolojisi girdisi olan atık döküm kumlarının farklı uygulama alanlarından bir tanesi de sol jel yöntemi ile malzeme sentezi odaklıdır [10]. Bunlardan son zamanlarda çoğunlukla silika aerojel dikkat çeken malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır [11-16]. Bu malzemenin sol jel yöntemi ile sentezleme çalışmalarında, jelleşme ile soldan jele geçişi sürecini içermektedir. Jelleşme süresi, jelleşme için sola eklenen katalizör (HCl) miktarına bağlıdır. Solun pH değerindeki artış, yoğunlaşma reaksiyonlarının hızlarını ve sonuç olarak silika kümelerini artırır. Düşük pH aralığında (1-2) silika parçacıkları pozitif yüklüdür ve birbirlerini iterler, böylece en uzun jelleşme süresine sahiptirler. pH 5'ten 8'e kadar olan değerlerde silika sollarının jelleşmesinin başladığı yerde silika parçacıkları negatif yüklüdür ve birbirlerini iterler. Bu pH aralığında viskozite değerinin artması ile jelleşmeyi gerçekleştirilmektedir

[17,18].

Yapılan bu çalışmada kum döküm teknolojisinde çoğunlukla atık döküm kumu olarak karşımıza çıkan bu kumun geri dönüşümü ve sol-jel yöntemi ile silika aerogel sentezi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle bu yöntemde farklı pH değerleri kullanılarak sentezlenen silika aerogel toz malzemesinin üretimi ve karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

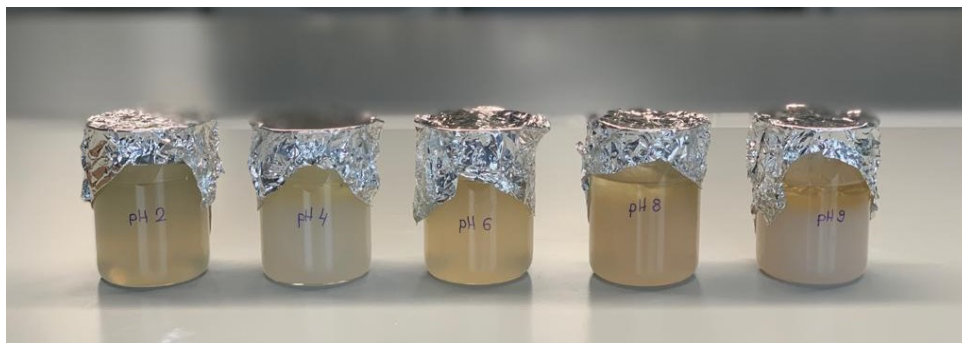
2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

Silika aerogel malzemesinin sol-jel yöntemi kullanılarak sentezlenmesi amacıyla, kum döküm teknolojisi atık döküm kumu (Eti Alüminyum Ürünü) kullanılmıştır. Başlangıç malzemesi kimyasal bileşimi için sırasıyla XRF ve XRD analiz çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra sodyum silikat çözeltisi elde edebilmek amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Bu amaç için ilk olarak, geri dönüşüm olarak kullanılan atık döküm kumunun saflaştırma işlemi saf su ile manyetik karıştırıcıda karıştırma işlemi sonrası gerçekleştirilmiştir. Daha sonra karışım içerisine pH 1 olana kadar 1M HCl ilave edilmiştir. Hazırlanan sulu çözelti 80 °C'de 2 saat süre ile ısıtıcı manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Bu işlemin hemen akabinde karışım siyah bant süzgeç kâğıdından süzülüp saf su ile yıkanmıştır. Yıkama işlemi tamamlandıktan sonra, etüvde 105 °C'de 1 gün kurutulmuştur. Kurutulmuş geri dönüşüm atık döküm kumu içerisine NaOH eklenerek bir çözelti elde edilmiştir. Hazırlanan bu çözelti 250 °C'de 2 saat otoklavda reaksiyon gerçekleşmesi bakımından bekletilmiştir. Böylelikle reaksiyon sonunda elde edilen karışım süzgeç kâğıdından süzülüp ana çözeltilerden ayrılarak sodyum silikat elde edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Sodyum silikat çözeltisi (Sodium silicate solution)

Hazırlanan çözeltiler dinlendirildikten sonra silika aerogel sentezi için kullanılmıştır. Silika aerogel üretimine pH değerinin etkisini incelemek için 2, 4, 6, 8, 9 olmak üzere 5 farklı pH değeri taranmıştır (Şekil 2). 10 ml sodyum silikat çözeltisinin üzerine 1M HCl eklenerek balıklı manyetik karıştırıcı yardımıyla pH'ı sırasıyla 2, 4, 6, 8, 9 olması sağlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler 25°C'de 24 saat bekletilmiştir ve böylelikle jelleşme işlemi tamamlanması sağlanmıştır.



Şekil 2. Çeşitli pH değerlerine sahip sodyum silikat çözeltileri (Sodium silicate solutions with various pH values)

Yaşlandırma işlemi için, jelleşme işlemi tamamlanmış olan numunelerin bünyelerindeki suyu uzaklaştırmak için 50°C'de 24 saat boyunca etüvde bekletilmişlerdir. Yaşlandırma aşamasında numunelerin herbirine 4 ml etanol ilave edilmiştir. Yaşlandırma aşamasından sonra numuneler

kurutmaya alınmıştır. Numuneler 50°C'de 24 saat süreyle etüvde sabit kurutulmuştur. Sentezlenen aerojellerin yapısında bulunan tuzları uzaklaştırmak amacıyla saf su ile yıkama gerçekleştirilmiştir ve 105°C'de 24 saat boyunca kurutulmuştur.

Sol-jel yöntemi ile silika aerjel parçacıklarının sentezlenmesi amacıyla, Tablo 1'de belirtilen çalışma parametreleri kullanılmıştır. Belirtilen çalışma parametreleri doğrultusunda geri dönüşüm atık döküm kumu kullanılarak, sentezleme çalışmaları için hazır hale getirilmiştir.

Tablo 1. Geri dönüşüm atık döküm kum içeriği ile aerjel üretim parametreleri (Aerogel production parameters with recycling waste casting sand content)

pH	Yaşlandırma sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma süresi (saat)	Kurutma tipi
2	50	24	50°C'de sabit kurutma
4			
6			
8			
9			

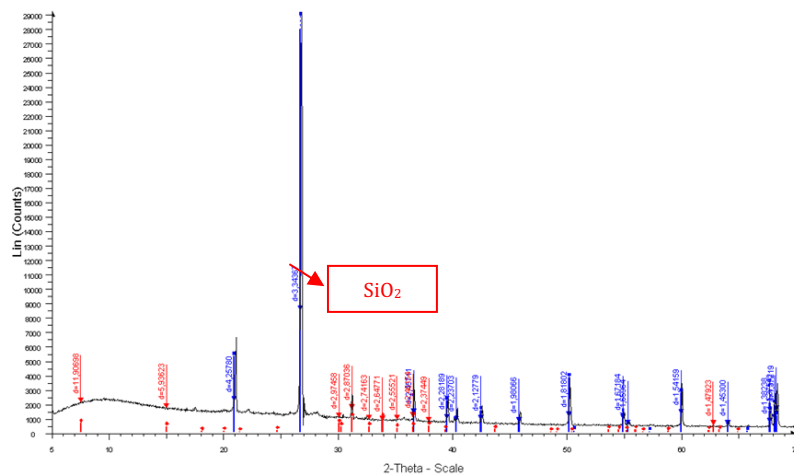
Silika aerjel malzemesi sentezleme çalışmalarına bağlı olarak, malzeme kristalografik özelliklerinin tespiti amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) analizi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Silika aerjel yapısının tanımlanabilmesi açısından bağ yapısı tespiti amacıyla Fourier dönüşümü infrared spektrometresi (FT-IR) çalışmaları yapılmıştır. Aynı zamanda farklı pH parametrelerine bağlı olarak silika aerjel malzemesinin yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Silika aerjel malzemesinin yoğunluk ölçümleri numunelerin kütle / hacim oranları tespit edilerek hesaplanmıştır. Geri dönüşüm atık döküm kumunun TMCS ile (chlorotrimethylsilane) yüzey modifikasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş sonrasında numunenin süper hidrofobikliğin tespiti için Temas Açısı ölçümü yapılmıştır. Son olarak sentezlenen silika aerjel toz formundaki malzemenin şekil ve morfolojisi bakımından, SEM (taramalı elektron mikroskobu) incelemeleri ile karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır.

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

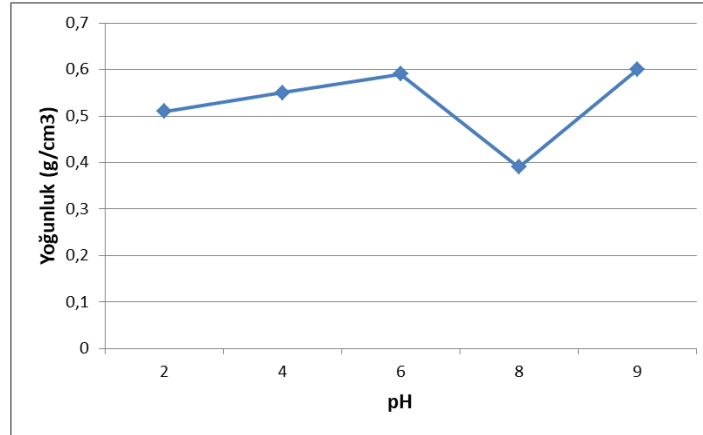
Başlangıç malzemesi olan geri dönüşüm atık döküm kumunun kimyasal bileşimi ve faz tayini sırasıyla XRF ve XRD analizleri kullanılarak belirlenmiştir. Tablo 2'de verilen XRF analiz sonucuna göre atık döküm kumunda %89 oranında silika içeriği tespit edilmiştir. Aynı zamanda eser miktarlarda diğer kimyasalların yer aldığı görülmektedir. Şekil 3'teki uygulanan XRD analiz sonucu incelendiğinde geri dönüşüm atık döküm kumunun yapısında (SiO₂, PDF no: 01-070-7344), demir oksit (Fe₂O₃, PDF no: 00-040-1139) yer aldığı görülmektedir.

Tablo 2. Atık Döküm Kumuna Ait XRF tablosu (XRF table of Waste Casting Sand)

Numunenin Adı	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Atık Döküm Kumu	89.00	2.07	3.33	0.29	2.04	-	0.13	-

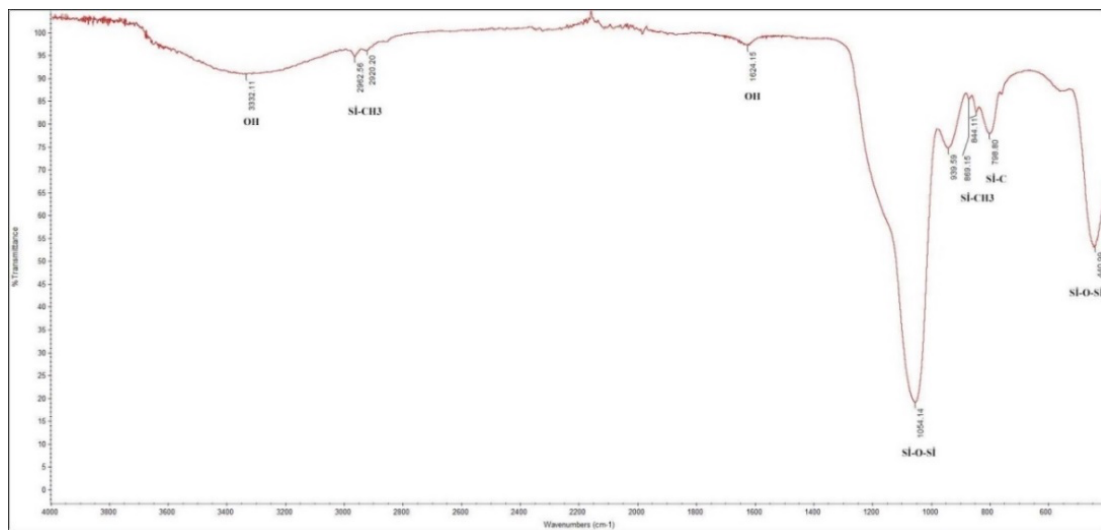


Mermer ve ark. Ultrason destekli sol-jel yöntemi ile kumdan aerojel sentezi üzerine gerçekleştirdikleri benzer bir çalışmada, SiO₂ yapısının en şiddetli pikinin benzer 2θ mesafesinde oluştuğunu ifade etmişlerdir. Bu bağlamda XRD analiz yapılan geri dönüşüm atık döküm kumunda benzer 2θ mesafesinde pik verdiği belirlenmiştir [12]. Geri dönüşüm atık döküm kumu kullanılarak farklı pH değerleri ile silika aerojel üretiminde tüm parametreler sabit tutularak pH değerinin etkisi incelenmiştir. Şekil 4'teki silika aerojel toz malzemesinin yoğunluk grafiği incelendiğinde, en düşük yoğunluk (0.39 g/cm³) pH 8 değeri ile tespit edilmiştir.

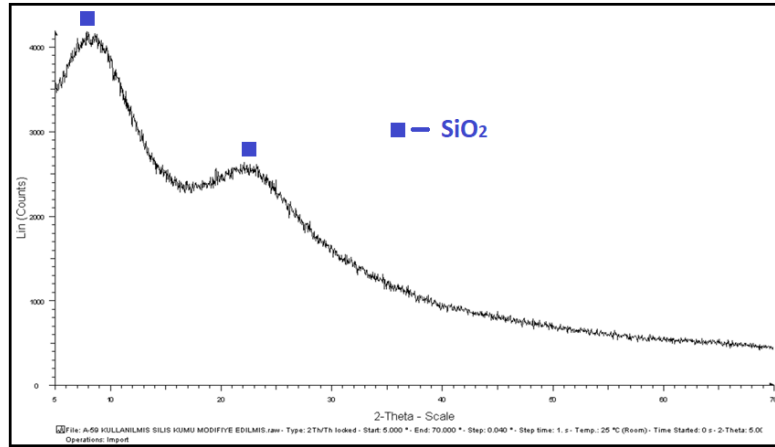


Şekil 4. Farklı pH değerleri ile yoğunluk sonuçları (Density results with different pH values)

Optimum pH 8 değeri ile elde edilen silika aerojel toz malzemesinin FT-IR analiz sonucu Şekil 5' te gösterilmiştir. FT-IR analiz sonucu incelendiğinde, yaklaşık olarak 3300cm⁻¹ ve 1600cm⁻¹ bölgelerinde yapı içerisinde fiziksel olarak nemden/sudan kaynaklı olarak O-H absorpsiyon bantları/titreşimlerinin yer aldığı görülebilmektedir. Aynı zamanda 440cm⁻¹ civarında Si-O-Si titreşimlerinin yanı sıra 2900cm⁻¹, 1050 cm⁻¹ ve 800-850cm⁻¹ civarında TMCS'nin yapıya bağlanması sonrası ortaya çıkan Si-C ve Si-CH₃ absorpsiyon bantları gözlemlenmiştir. Buda sentezlenen silika aerojel toz malzemesinin suyu iten özellikte yani hidrofobik olduğunu göstermektedir. Aynı malzeme üzerine uygulanan XRD analiz sonucu ise Şekil 6' da gösterilmiştir. Şekil 6' da verilen geri dönüşüm atık döküm kumundan üretilen silika aerojelin XRD analiz sonucu değerlendirildiğinde, silika aerojel malzemesinin amorf yapıda olduğu görülebilmektedir. Bu bağlamda literatürle uyumlu olarak 2θ = 24°'de amorf yapıdaki silisyum pikinin yer aldığı tespit edilmiştir [12,19,20]. Aynı zamanda farklı bir safsızlık veya kirlilik bakımından herhangi bir fazında yer almadığı belirlenmiştir.

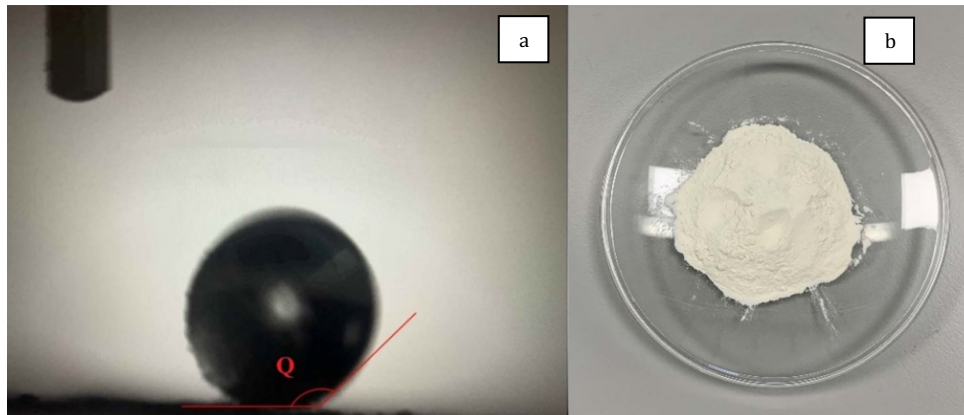


Şekil 5. Süper hidrofobik silika aerojel FT-IR spektrumu (FT-IR spectrum of super hydrophobic silica aerogel)



Şekil 6. Süperhidrofobik silika aerogel XRD analizi (XRD analysis of superhydrophobic silica aerogel)

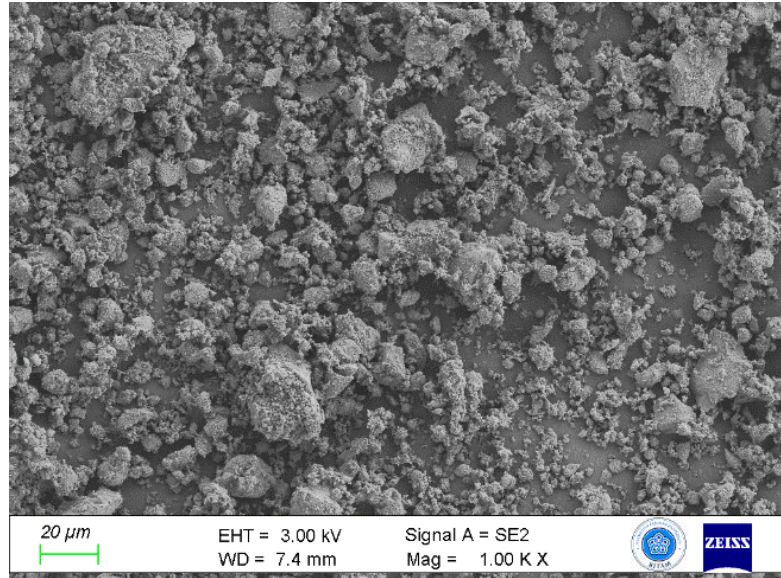
Geri dönüşüm atık döküm kum içeriği kullanımı sonrası sentezlenen silika aerogel malzemesinin TMCS ile yüzey modifikasyonu sonucu ve toz malzeme genel görünümü verilmiştir (Şekil 7). Şekil 7a' da verilen temas açısı ölçümü incelendiğinde, silika aerogel numunesinin temas açısı 150°'den büyük olarak ölçülmüştür. Bu nedenle su damlacığı yüzeyden akarak uzaklaşmıştır. Bu değer geri dönüşüm atık döküm kumundan üretilen silika aerogel numunesinin süper hidrofobik özellikte olduğunu göstermektedir. Deneysel çalışmalar doğrultusunda sentezi ve karakterizasyonu tamamlanan silika aerogel malzeme toz görseli incelendiğinde (Şekil 7b), silika aerogel malzemesinin pudramsı formunda olduğu görülmektedir. Aynı zamanda düşük mikronize boyutlarında bulunduğundan, silika aerogel toz malzemesinin topaklanma/kümelenme eğiliminde olduğu da ayrıca görülmektedir.



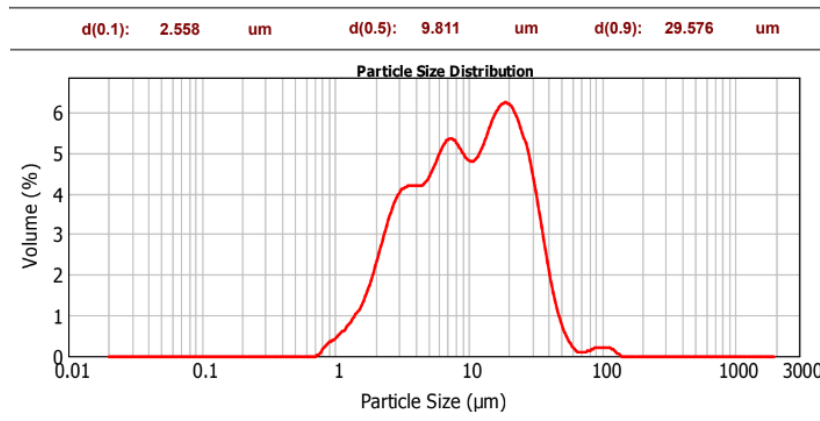
Şekil 7. Silika aerogel malzemesinin; a) Süperhidrofobik silika aerogelin temas açısı, b) Genel görünümü (Silica aerogel material; a) Contact angle of superhydrophobic silica aerogel, b) General view)

Silika aerogel toz malzemesinin şekil ve morfolojik açıdan değerlendirilmesi için elde edilen SEM mikro yapı görüntüsü Şekil 8' de gösterilmiştir. SEM mikro yapı görüntüsü incelendiğinde, tozların düzensiz şekil ve morfolojisine sahip olduğu görülebilmektedir. Sentezlenen silika aerogel toz malzemenin çoğunlukla çok küçük boyutlarda (<10µm) olduğu belirlenmiştir. Özellikle küçülen toz boyutuna bağlı olarak tozlarda kümelenme eğilimi/agglomerasyon oluşumları görülebilmektedir. Bu durumdan kaynaklı olarak bazı bölgelerde toz tanelerde irileşme olduğu tespit edilmiştir.

Sol-jel yöntemi kullanılarak atık dökümü başlangıç malzemesi ile üretilen silika aerogel malzemesinin parçacık boyut analizi sonucu Şekil 9' da verilmiştir. Şekil 9' da verilen parçacık boyut analizi sonucu incelendiğinde, silika aerogel malzemesinin ortalama parçacık boyutu $d(0.5) = 9.811\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm sonucu numune hacminin %50'sinin $9.811\mu\text{m}$ parçacık boyutundan daha küçük olduğunu tanımlamaktadır. Şekil 8' de verilen SEM görüntüsünden de anlaşılacağı üzere parçacık boyutunun oldukça küçük olduğu ve neredeyse nano mertebeye yakın olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 8. Silika aerogel malzemesinin SEM görüntüsü (SEM image of silica aerogel material)



Şekil 9. Silika aerogel parçacık boyut analizi (Silica aerogel particle size distribution)

4. Sonuçlar (Conclusions)

Geri dönüşüm atık döküm kumu kullanılarak son zamanlarda hafifliği ve üstün özellikleri ile dikkat çeken silika aerogel malzemesinin sol-jel yöntemi ile sentezi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir;

Ülkemizde sanayinde yaygın olan kum döküm teknolojisi bakımından, çoğu dökümhanelerde atık olarak yer alan döküm kumunun kullanımı sonrası silika aerogel malzeme üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Geri dönüşüm atık döküm kumunda SiO₂ faz yapısı ve %89.00 olarak kimyasal bileşimi tespit edilmiştir. Son zamanlarda hafifliği ile ön plana çıkan ve Sol-jel yöntemi ile süperhidrofobik özelliğe sahip silika aerogel malzeme, en düşük yoğunluk değeri 0.39 g/cm³ olarak 8 pH değerinde elde edilmiştir. FT-IR spektrumu ile silika aerogel sentezi bakımından, Si-C, Si-O-Si ve Si-CH₃ temel absorpsiyon bantlarının varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca XRD analiz sonucu ile amorf yapıdaki silika aerogel ve temel oluşum pikleri belirlenmiştir. Süperhidrofobik malzeme sentezi ile doğrudan ilişkili olarak, silika aerogel malzemesinin temas açısı 150°'den büyük olarak ölçülmüştür.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

[1] A. Çüçen, Y. T.Altuncı, "Investigating the Opportunities to Use Nanotechnological Building Materials In Architecture," *Journal*

of *Technical Science*, vol. 12, no. 1, pp. 17-23, January 2022. doi:10.35354/tbed.984956

[2] S. Alan, G. G. Akkurt, S. Akkurt, H. Ç. Sezer, A. Çam, "Thermal and hygrothermal characterization of aerogel insulation blankets," *Harran University Journal of Engineering*, vol. 6, pp. 58-69, Kasım 2021. doi:10.46578/humder.870400

[3] L. Bostancı, "Mechanical, Pore Structure and Microstructural Properties of Alkali-Activated Fly Ash Mortars Containing Silica Aerogel," *BSEU Journal of Science*, vol. 7, no. 2, pp. 588-608, Aralık 2020. doi:10.35193/bseufbd.719911

[4] G. G. Kaya, H. Deveci, "Morphological, Textural And Thermal Properties of Low-Cost Silica Aerogel Composites," *Konya Journal of Engineering Sciences*, vol. 9, no. 3, pp. 787-796, Eylül 2021. doi:10.36306/konjes.969489

[5] L. Bostancı, "Mechanical, Pore Structure, Thermal Conductivity and Microstructure Properties of Silica Aerogel-Incorporated Hybrid Silica Fume Mortars," *Dicle University Journal of Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 147-163, Ocak 2021. doi:10.24012/dumf.754876

[6] J. L. Gurav, I. K. Jung, H. H. Park, E. S. Kang, D. Y. Nadargi, "Silica Aerogel: Synthesis and Applications," *Journal of Nanomaterials*, pp. 11, August 2010. doi:10.1155/2010/409310

[7] J. Zhu, J. Xie, X. Lü, D. Jiang, "Synthesis and characterization of superhydrophobic silica and silica/titania aerogels by sol-gel method at ambient pressure," *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, vol. 342, no. 1-3, pp. 97-101, June 2009. doi:10.1016/j.colsurfa.2009.04.016

[8] M. Y. Kılıç, M. Tüylü, "Bursa'daki Atık Döküm Kumlarının Endüstriyel Simbiyoz ile Hazır Beton Üretiminde Hammadde Olarak Kullanımı," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, cilt. 24, sayı 1, s. 99-110, Şubat 2019. doi:10.17482/uumfd.463234

[9] B. Bhardwaj, P. Kumar, "Waste foundry sand in concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 156, pp. 661-674, December 2017. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.010

[10] A. E. Çimen, N. Toplan, "Döküm Kumu ve atık döküm kumundan silika esaslı aerogel toz eldesi," *Metal Dünyası Dergisi*, cilt. 329, Kasım 2020.

[11] A. S. Dorcheh and M. H. Abbasi, M.H. "Silica aerogel; synthesis, properties and characterization," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 199, no. 1-3, pp. 10-26, April 2008. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060

[12] N. K. Mermer, S. Pişkin, "Synthesis and Characterization of Industrial Casting Sand Based Silica Aerogel," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 34, no. 3, pp. 1253-1263, Mayıs 2019. doi:10.17341/gazimmfd.460521

[13] J. Fricke, T. Tillotson, "Aerogels: production, characterization, and applications," *Thin Solid Films*, vol. 297, no. 1-2, pp. 212-223, April 1997. doi:10.1016/S0040-6090(96)09441-2

[14] N. K. Mermer, "Silika temelli aerogellerin sol-jel yöntemi ile sentezi ve yapısal özelliklerin incelenmesi," Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.

[15] T. Zhou, L. Gong, X. Cheng, Y. Pan, C. Li, H. Zhang, "Preparation and characterization of silica aerogels from by-product silicon tetrachloride under ambient pressure drying," *Journal of Non-Crystalline Solid*, vol. 499, pp. 387-393, November 2018. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2018.05.036

[16] Q. Wang, J. Feng, L. Ma, W. Wei, J. Xie, C. Xia, J. Zhu, D. Jiang, "Synthesis, characterization, and adsorption properties of silica aerogels crosslinked with diisocyanate under ambient drying," *Journal of Materials Science*, vol. 51, pp. 9472-9483, October 2016. doi:10.1007/s10853-016-0191-2

[17] P. B. Sarawade, J. K. Kim, J. K. Park, H. K. Kim, "Influence of Solvent Exchange on the Physical Properties of Sodium Silicate Based Aerogel Prepared at Ambient Pressure," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 6, no.1, pp. 93-105, December 2006. doi:10.4209/aaqr.2006.03.0008

[18] D. C. Öz, B. Öz, N. Kaya, "The effect of aging and drying time on the physical properties of alumina aerogels," *Journal of BAUN Insitu of Science Technology*, vol. 20, no. 1, pp. 198-211, July 2018. doi:10.25092/baunfbd.348344

[19] Z. M. Tobin, L. F. Posada, A. M. Bechu, M. K. Carroll, R. M. Bouck, A. M. Anderson, B. A. Bruno, "Preparation and characterization of copper-containing alumina and silica aerogels for catalytic applications," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 84, pp. 432-445, June 2017. doi:10.1007/s10971-017-4425-9

[20] H. E. Rassy, A. C. Pierre, "NMR and IR spectroscopy of silica aerogels with different hydrophobic characteristics," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 351, no. 19-20, pp. 1603-1610, July 2005. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2005.03.048

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Internal Flow Analysis and Prototype Manufacturing of Flash Hider Designs

Halil Özaslan^{a*}, Mustafa Bozdemir^b

Submitted: 10.03.2022 Revised: 17.08.2022 Accepted: 17.10.2022 doi:10.30855/gmbd.0705033

ABSTRACT

When firearms are fired by a user, high-looking flames are formed at the muzzle end. High flame appearances have serious harms, especially in night use of firearms. The resulting flames can blind the user and cause enemy forces to reveal the user's position. For these and other reasons, devices attached to the muzzle of firearms have been developed. The most commonly used muzzle devices are muzzle brakes, silencers, and flame suppressors. In the study, internal flow analyzes were made by designing three different flame concealers with special functions in order to increase the night vision of the user and hide his position, especially during night use. Afterwards, the prototypes of the models were produced in a 3d printer. Using the traditional design method, three different flame-hiding models with special structures and functions to be used in 7.62 mm calibers were designed with SolidWorks and internal air flow analyzes were made with SolidFlow. Prototypes of the designed models were produced with a three-dimensional printer. As a result of the analyzes made, Atabey Multi-Function Flash Hider minimizes the flame appearance after the barrel explosion, increasing the night vision of the user and hiding his position. It can cut wires with its special design, and it can also be used for one-on-one defense against enemy forces with its cutting and piercing structure. With the added special functions, it has been hiding a unique flame in its field.

Keywords: Muzzle Devices, Flash Hider, Silencer, Muzzle Brake

^{a*} Kırıkkale Üniversitesi,
Fen Bilimleri Enstitüsü,
Savunma Teknolojileri Anabilim dalı,
71100, Kırıkkale, Türkiye
Orcid: 0000-0002-6573-3681
e mail: h.ozaslan.7@gmail.com

^b Kırıkkale Üniversitesi,
KMYO,
Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü,
71100, Kırıkkale, Türkiye
Orcid: 0000-0002-9332-2054

*Corresponding author:
h.ozaslan.7@gmail.com

Alev Gizleyen Tasarımlarının İç Akış Analizi ve Prototip İmalatı

ÖZ

Ateşli silahların bir kullanıcı tarafından ateşlenmesiyle namlu ucunda yüksek görünümlü alevler oluşur. Ateşli silahların özellikle gece kullanımlarında yüksek alev görünümlerinin ciddi zararları vardır. Oluşan alevler, kullanıcın gözlerini kör edebilir ve düşman kuvvetler tarafından kullanıcının konumunun açık edilmesine neden olurlar. Başlıca bu ve diğer nedenlerden dolayı ateşli silahların namlu ucuna takılan cihazlar geliştirilmiştir. Namlu ucu cihazlarından en yaygın olarak kullanılanları ise namlu frenleri, susturucular ve alev gizleyenlerdir. Yapılan çalışma da özellikle gece kullanımlarında kullanıcının gece görüşünü artırıp, konumunu gizlemek için ve içerisinde özel fonksiyonlarda bulunan üç farklı alev gizleyen tasarlanarak iç akış analizleri yapılmıştır. Sonrasında modellerin prototipleri 3d yazıcıda imal edilmiştir. Geleneksel tasarım yöntemi kullanılarak 7.62 mm kalibrelerde kullanılmak üzere özel yapı ve fonksiyonları bulunan üç farklı alev gizleyen modeli SolidWorks ile tasarlanarak SolidFlow ile iç hava akış analizleri yapılmıştır. Tasarlanan modellerin, üç boyutlu yazıcı ile prototipleri imal edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen ile namlu patlaması sonrasında oluşan alev görünümü en fazla minimize edilerek kullanıcının, gece görüşü artırılır ve konumu gizlenir. Özel tasarımı ile telleri kesebilir, kesici ve delici yapısı ile düşman kuvvetlere karşı birebir müdafaa da kullanılabilir. Eklenen özel fonksiyonlar ile alanında eşsiz bir alev gizleyen olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Namlu Cihazları, Alev Gizleyen, Susturucu, Namlu Freni

1. Giriş (Introduction)

Devletimizin farklı devletlere özellikle savunma sanayisinde olan bağımlılığı büyük oranda azalmıştır. Elektrik, su ve buhar gibi kuvvetlerin değerlendirilmesi ile beraber başlayan teknolojik gelişmeler, son zamanlarda önemli ölçülerde üretimler ve imalatlar yapılmasına olanak sağlamıştır. Ulaşım, sağlık ve makine gibi sektörlerine ek olarak savunma sanayi sektörü de bu teknolojik gelişmelerden önemli ölçüde üzerine düşeni almıştır. Mühimmat, robot, silah, ve insansız araçlar savunma sanayinin başlıca konuları olarak adlandırılmaktadır. Devletlerin savunma alanında yaptığı çalışmalar, günümüz koşullarında ülkelerin ana fonksiyonu olarak kabul edilmesi öngörülmektedir. Devletlerin savunma sanayi konularında yapmış oldukları projeler, devletlerin kalkınmalarının devamlılığı ve devletlerin kaynaklarının gerçek alanında değerlendirilmesinin devlet güvenliğine olan önemli etkileri ile başı çekmektedirler. Gelişen insanlı ve insansız teknoloji ile birlikte silah sistemlerinde de olumlu yönde ciddi gelişmeler olmaktadır [1].

Devletlerin kendi olanakları ile üretemedikleri savunma sanayi malzemelerini ve ürünlerini farklı devletlerden temin etmek istemektedirler. Bu durumlar ile talepte bulunan devletler hem kendi ülke ekonomilerine ciddi derece de büyük para kayıplarına neden olurlar hem de bu talep ile talep edilen devlete mecbur olarak bağımlı hale gelirler. Böylesi durumlarsa ister istemez diğer devletin olası yaptırımları ve anormal istekleri kaçınılmaz olmaktadır. Devletlerini, diğer ülkelere bağımlı hale getirip onların hem ekonomik olarak hem de siyasal olarak daha güçlü olmasını isteyen araştırmacılara önemli ölçüde görevler düşmektedir[2].

Özellikle son zamanlarda tasarımları orijinal olan ve mühendislik çalışmalarına sahip olunan malzeme ve parçaları artırma aşamasına geçilmiş, milli ve yerli projeler sistemin içine dahil edilmiştir. Bilahare son zamanlarda imalat doneleri, analiz ve tasarım bilgileri ile gerekli donelere sahip olunmasıyla birlikte kendimize özel ürünler ortaya çıkacak, mühendislik çalışmalarına ve savunma sanayine gerçek destekler işte o zaman yapılabilir[3].

Devletimizin savunma politikası olarak özellikle son yıllarda Türk Silahlı Kuvvetleri'nin gerekli ihtiyacı olan araç, gereci mühimmat ve silahların projelerini yerli ve milli projelerde geliştirerek hazırlayan ve sonrasın da imal etme çabası üzerinde bilahare önemle durulan ana konuların başında gelmektedir [4].

Çinliler tarafından icat edilen barutun kullanılmaya başlanmasıyla birlikte gerçekleşen namlu patlamasıyla oluşan alev görünümü ve duman problemi kullanıcılarda sıkıntılara yol açmıştır. Kullanıcı tarafından ateşli silahın ateşlenmesi kara barutun yanmasına neden olur. Sonrasında ise bu yanmaya alev parlamaları, kıvılcımlar ve hem kullanıcıyı hem de hedefi esir alan beyaz dumanlar eşlik eder. Bu problemler kişileri ve devletleri bir çözüm aramaya itmiştir. İlk zamanlar da Almanya bu konunun üzerine gidip bir alev gizleyen tasarlayıp otomatik silahlarda kullanan ilk devletlerden olmuştur [5].

Farklı ve daha kısa namlulu silahların sisteme dahil edilmesiyle namlu patlaması sonrasında oluşan yüksek alev görünümü özellikle gece kullanımlarında kullanıcıya ciddi sorunlar yaratmıştır. Bu sorunların başlıcalarını ateşli silahın ateşlenmesiyle namluda oluşan yüksek alev görünümünün kullanıcıyı özellikle gece rahatsız ederek kör olmasına ve düşman kuvvetler tarafından konumunun açık hale gelmesi çeker [6].

Namlu ucu cihazı olan alev gizleyenler, özellikle II. Dünya Savaşı'nın sonlarında ve daha sonrasında saldırı tüfeği tasarımlarında yaygınlaşmıştır ve bugün tabiri caizse tüm saldırı tüfeklerinde kullanılan evrensel bir duruma gelmiştir [7].

Alev gizleyenler farklı isimler ile de adlandırılmaktadır. Bunların başlıcaları, alev konisi, alev koruması ve alev eliminatörüdür. Bu namlu ucu cihazları ateşli silahın ateşlenmesi ile oluşan alev topunu minimize etmek için özel olarak tasarlanmışlardır[8].

Namlu ucuna takılan alev gizleyenler kullanıcılar için ciddi avantajlar sağlamaktadır. Namlu patlamasıyla oluşan yüksek görünümü alevin absorbe edilerek kullanıcının özellikle gece operasyonlarında kullanıcıya üstün gece görüşü sağlamanın yanında düşman kuvvetlere konumunu açık etmeyerek bir üstünlük daha sağlar. Eklenen özel fonksiyonlar ile tel kesme, kapı kırma, namlu frenlemesi gibi üstünlüklerde sağlar. Ekstra sağlamış olduğu ağırlık ve düşme, çarpma gibi etkilerle zarar görmesi ise dezavantajlarındandır [9].

Namlu frenleri ile alev gizleyenler genellikle karıştırılmaktadırlar. Her ikisi de aynı yere monte edilirler. Fakat zaman zaman her ikisi de birbirinden çok farklıdır. Alev gizleyenler namlu patlamasıyla oluşan alev görünümünü absorbe ederken, namlu freni ise namlu patlaması sonrasında oluşan yüksek geri tepmeyi azaltmaktadır. Alev gizleyenler gibi alevleri absorbe etmek yerine daha fazla aleve neden olurlar [10].

Yapılan araştırmalar ve incelenen çalışmalar neticesinde, İkinci Dünya Savaşı'ndan bu yana alev gizleyenler üzerinde çok ilerleme kaydedilmiştir. Bastırıcı olarak katkı maddelerinin yanı sıra, namlu ağız frenleri ve patlama reflektörlerinin alev üzerinde bir miktar etkisi olduğu ortaya çıkmıştır. Bu gözlem, namlu ağızının patlaması ve parlamasının mekanizmasını öğrenmeye yönelik organize girişimlere yol açmıştır. Bugüne kadar önemli miktarda veri toplanıp, çeşitli derecelerde başarı ile çeşitli tasarımlarda mekanik alev gizleyiciler ve alev baskılayıcılar geliştirilmiştir. Bununla birlikte, mekanik veya kimyasal olarak verimli, pratik bir alev gizleyen elde etmek için hala çok fazla ilerlemeye ihtiyaç vardır [11,12].

Bu çalışmalar kapsamında yerli ve milli piyade tüfeği MPT-76' ya göre namlu patlaması sonrasında ortaya çıkan alev görüntüsünü minimize eden, çok fonksiyonlu ve geliştirilmiş alev gizleyen tasarımları bilgisayar destekli tasarım programlarından SolidWorks kullanılarak tasarlanmış ve iç akış analizleri SolidFlow ile yapılarak seçilen optimum modelin, üç boyutlu yazıcı Zortrax firmasının ürettiği M200 modeli ile prototipi imal edilmiştir.

2. Malzeme ve Metot (Material and Method)

Yapılan çalışmada yerli ve milli piyade tüfeği MPT-76' ya göre namlu patlaması sonrasında ortaya çıkan alev görüntüsünü minimize eden, çok fonksiyonlu ve geliştirilmiş alev gizleyen tasarımları yapılmıştır. Alev gizleyenlerin malzemesi, dayanıklı olması için gerçekte üretileceği zaman paslanmaz çelik veya titanyumdan olması ve malzemesinin üzerine bir kaplama yapılarak alev gizleyeni korozyona, aşınmaya ve ısıya karşı çok daha iyi korunur hale getirileceği öngörülmüştür. MPT-76 namlusuna uyacak şekilde tasarlanan alev gizleyenler, namlu patlaması sonucu oluşan alev görünümünü minimize eden içerisinde yeterli odacıkları barındıran ölçülerde tasarlanmıştır. Modellenen alev gizleyen tasarımları ile ateşli silah kullanıcısının, ateşli silahını ateşlemesi neticesinde oluşan namlu patlamasıyla özellikle gece kullanımlarında kullanıcının gözlerinin kör olmasını engelleyerek, gece görüşünü artırması ve özellikle gece kullanımlarında ateşli silah kullanıcısının konumunu gizleyerek düşman kuvvetler tarafından bulunmasını zorlaştırmıştır. MPT-76'ya göre özel olarak tasarlanan üç farklı alev gizleyenin iki temel özelliğinin yanında fonksiyonel özellikleri de bulunmaktadır. Yapılan özel tasarımlar ile alev gizleyenler aynı zamanda namlu freni özelliği de taşımaktadır. Alev gizleyenlere eklenen namlu freni özelliği ile ateşli silah kullanıcısının ateşli silahı ateşlemesiyle oluşan namlu patlaması sonucu alev görüntüsünü absorbe etmesinin yanında sarsılmayı ve geri tepmeyi azaltarak atıcının hem silaha daha kolay ve rahat hâkim olmasını sağlamıştır hem de sarsılmayı azaltması sonucu hedef doğruluğunu artırarak, vurulmak istenen hedefin doğruluğunu artırmıştır. Tasarlanan alev gizleyen modellerinin bir diğerine temel iki özelliğinin yanında eklenen diğer özel fonksiyon ise tel kesme aparatıdır. Alev gizleyenin ucuna eklenen dört adet tırnağın hizalanması neticesinde ateş yapılarak teller kesilir. Eklenen tırnaklar tel kesmenin yanında alev görünümünü minimize etmeye de yardımcı olmaktadır. Tasarlanan alev gizleyen modellerinin bir diğerinin fonksiyonel özelliği ise üzerinde bulunan kesici ve delici dikenli yapılardır. Yapılan özel tasarım ile olası birebir müdafaa ve saldırı gerektiren anlarda atıcının hiç vakit kaybetmeden düşman kuvvetlere bu kesici ve delici yapı ile saldırıp yok etmesi tasarlanmıştır. MPT-76'ya göre özel olarak tasarlanan alev gizleyenleri silahın namlu ucuna takmak için en etkili, sağlam ve kolay olan ezme rondelâları kullanılmıştır. Böylece alev gizleyenler çok daha kolay ve sağlam bir şekilde ateşli silah namlusuna takılır [9, 13].



Şekil 1. MPT-76 da kullanılan alev gizleyen modeli [14] (Flash hider model used in MPT-76)

Yapılan tasarımlarda, geleneksel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bilgisayar Destekli Tasarım programlarından Solidworks ile alev gizleyenlerin modellemeleri yapılmış ve SolidFlow ile de akış hesaplamaları yapılmıştır. Solidworks de yapılan modellemeler, akış hesaplamaları ve fonksiyonel özelliklerin değerlendirilmesi sonucu seçilen optimum modelin imalatı için üç boyutlu yazıcı Zortrax firmasının ürettiği M200 modeli kullanılmıştır. Üç boyutlu yazıcı malzemesi olarak da Z-Ultrat kullanılmıştır [15].

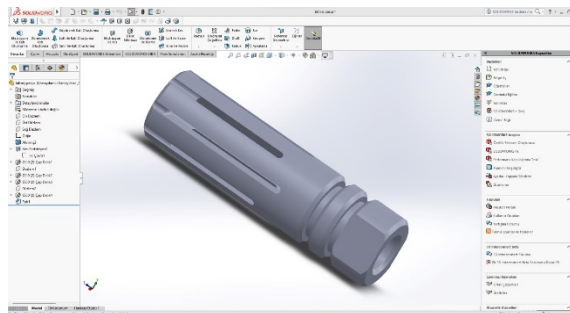
Üç boyutlu yazıcılar , üç eksenli bir alanda seçilen parça malzemesi ile katmanlar olarak üst üste yerleştirilerek birçok parçalar üretirler. Üç boyutlu yazıcılar ile mühendislikten eğitime, sanattan tıp alanı gibi birçok farklı dalda kullanılan yeni bir teknolojidir. Bilahere üç boyutlu yazıcılar son zamanlarda çok popüler hale gelmiştir. Dünyayı değiştirecek teknoloji olarak adlandırılmaktadırlar ve çok büyük beklentileri beraberinde getirmektedir. Üç boyutlu yazıcılar ile istenilen parçalar çok ucuz ve çok hızlı bir şekilde imal edilmesi bir çok kişinin işine gelmektedir [16, 17, 18, 19].

2.1. Alev Gizleyenlerin SolidWorks ile Katı Modellemesi (Solid Modeling of Flash Hider Concealers with SolidWorks)

Birbirinden farklı yapı, fonksiyon ve tasarım özellikleri taşıyan üç çeşit alev gizleyen tasarlanmıştır. Her bir alev gizleyen farklı malzemeden yapılmıştır. Alev gizleyenlerin her biri ayrı tasarlanmış ve farklı özellikler içermektedir. Tasarlanan alev gizleyen modelleri gerçeği ile birebir aynı ölçüleri taşımaktadır. Her bir alev gizlenin namluya takılan dış geçiş bölümü ve alevi absorbe eden bölümü vardır. Tasarlanan alev gizleyenlerin içerisinde geçen akışın hesaplanıp ve birbirleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Bu işlem için SolidFlow programı kullanılmıştır. Tasarlanan alev gizleyenlerin çizimi, katı modellemesi ve akış testi SolidWorks programında yapılmıştır. Tasarlanıp, katı modellemesi yapılan alev gizleyenler tek parçadır. Tasarlanan alev gizleyen modelleri 7,62 kalibre de MPT-76 piyade tüfeğine kolaylıkla monte ve demonte edilebilmektedir.

2.1.1. Gökbey alev gizleyen katı modeli (Gökbey flash hider solid model)

Şekil 2’de gösterilen SolidWorks programında tasarlanıp katı modellemesi yapılan Gökbey Alev Gizleyen modeli, gerçekte paslanmaz çelikten yapılması öngörülmüştür. 7.62 Nato mermisinin kullanılabilceği bir tasarım modellemesi yapılmıştır. Yanlardan açılan uzunlamasına yarıklar ile namlu patlaması sonucunda oluşan alevler buralarda absorbe edilip minimize edilerek dışarıya doğru çıkışı sağlanır. Gökbey Alev Gizleyen üzerinde bulunan uzunlamasına yarıklar sayesinde namlunun ve dışarı çıkan yüksek basınçlı gazların soğumasını hızlandırılır. Malzemesinin paslanmaz çelik olmasından dolayı çok fazla basınç ve yüksek sıcaklığa dayanmaz kaplama yapılmalıdır. MPT- 76’ya ezme rondelâları ile takılmak üzere dişi namlu bağlantı noktasına sahiptir. Hizalama gerektirmez. Ezme rondelâları ile kolay monte ve demonte edilebilir.

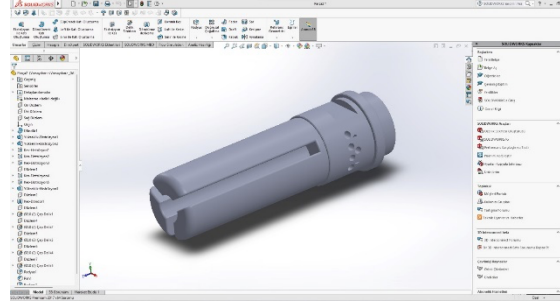


Şekil 2. Gökbey alev gizleyen modeli (Gökbey flash hider solid model)

2.1.2. Ulubey alev gizleyen katı modeli (Ulubey flash hider solid model)

Şekil 3’te gösterilen SolidWorks programında tasarlanıp katı modellemesi yapılan Ulubey Alev Gizleyen modeli, gerçekte paslanmaz çelikten yapılması öngörülmüştür. 7.62 Nato mermisinin kullanılabilceği bir tasarım modellemesi yapılmıştır. Ulubey Alev Gizleyen modelin de namlu patlaması sonrasında oluşan yüksek alev görünümü, üzerinde bulunan dairesel deliklerden ve kapalı silindirik haznenin absorbe etmesiyle minimize olarak çıkar. Özel tasarımı ve içyapısı ile geri tepmeyi azaltarak hedef doğruluğunu artırır. Kapalı haznenin olması sesi kısmen de olsa bastırır ve bir

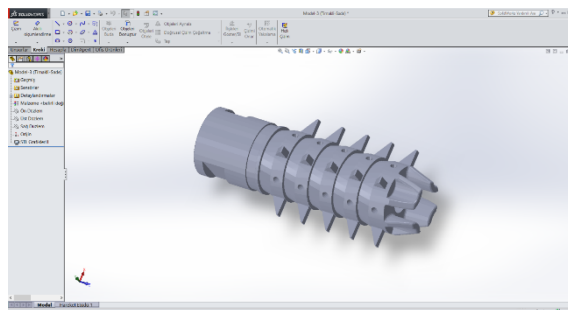
susturucu özelliği de taşımasını sağlar. Malzemesi paslanmaz çelik olmasından dolayı yüksek ısı ve basınca çok dayanmaz. Bu sebepten kaplama yapılmalıdır. MPT- 76'ya ezme rondelâları ile takılmak üzere dişi namlu bağlantı noktasına sahiptir. Hizalama gerektirmez. Ezme rondelâları ile kolay monte ve demonte edilebilir.



Şekil 3. Ulubey alev gizleyen katı modeli (Ulubey flash hider solid model)

2.1.3. Atabey alev gizleyen katı modeli (Atabey flash hider solid model)

Şekil 4'te gösterilen SolidWorks programında tasarlanıp katı modellemesi yapılan Atabey Alev Gizleyen modeli, gerçekte titanyum malzemeden yapılması öngörülmüştür. 7.62 Nato mermisinin kullanılabileceği bir tasarım modellemesi yapılmıştır. Milli piyade tüfeği MPT-76'nın kullanıcı tarafından ateşlenmesiyle oluşan namlu patlamasıyla meydana gelen yüksek alev görünümü, Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin üzerinde bulunan dairesel deliklerden ve dört tırnağın absorbe etmesiyle minimize olarak çıkar. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen üzerinde bulunan delikler ve ucundaki tırnaklar ile yüksek basınç düşürülür ve yüksek sıcaklıktaki alevler ise çok hızlı bir şekilde soğutulur. Yapılan özel tasarım modellemesi ile namlu patlamasıyla oluşan geri tepme kuvveti azalır. Böylece MPT-76 kullanıcısı özellikle gece kullanımlarında namlu patlaması sonrasında oluşan yüksek görünümlü alevlerden kurtularak kör olma riskinden kurtulmuştur ve gece görüşü artmıştır. Ayrıca gece operasyonlarında kullanıldığı takdirde düşman kuvvetler tarafından Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen sayesinde konumunun belirlenmesi daha zor hale gelmiştir. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin sunmuş olduğu bir diğer fonksiyon da ise namlu ucunda bulunan dört adet tırnağın telleri hizalayıp, piyade tüfeğinin ateşlenmesi ile çok kolay bir şekilde teller kesilir. Bu özellik ile çok kolay ve hızlı bir şekilde tel kesme işlemleri de tamamlanmış olur. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli üzerinde bulunan kesici ve delici dikenli yapılar ile olası mühimmat bitmesi veya ani bir düşman kuvvet ile birebir de müdafaa veya saldırı durumunda kullanıcının kendini kollayıp düşman kuvvete zarar vermesini sağlar. Bu şekilde kullanıcı çok hızlı bir şekilde reaksiyon vererek kendisini korumaya ve saldırıya hazır halde bulur. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli gerçekte titanyum malzemeden yapılması öngörülmüştür. Yüksek sıcaklık ve basınçlara karşı çok dayanıklıdır. Kaplama gerektirmez. MPT- 76'ya ezme rondelâları ile takılmak üzere dişi namlu bağlantı noktasına sahiptir. Hizalama gerektirmez. Ezme rondelâları ile kolay monte ve demonte edilebilir.

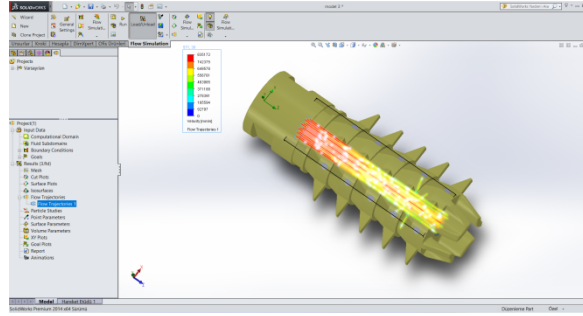


Şekil 4. Atabey çok fonksiyonlu alev gizleyen katı modeli (Atabey multifunctional flash hider solid model)

2.2. Alev Gizleyenlerin SolidFlow ile Akış Hesabı (Flow Calculation of Flash Hider with SolidFlow)

Tasarlanan üç modelin SolidFlow programı ile iç akış analizleri hesaplanmıştır. Gökbey Alev Gizleyen modelinin akış analizi SolidFlow programında yapılmıştır. Gökbey Alev Gizleyen modelinin malzemesi paslanmaz çelikten seçilmiştir. 1 atm basınç, 20,05 derece santigrat hava koşulları kullanılarak ve

edilmektedir. Detaylı veriler Şekil 9. ve Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Atabey alev gizleyen modelinin akış analizi (Flow analysis of Atabey flash hider model)

Name	Properties	Checked	Comment
Atabey Flash Hider 1	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 2	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 3	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 4	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 5	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 6	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 7	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 8	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 9	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 10	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 11	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 12	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 13	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 14	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 15	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 16	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 17	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 18	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 19	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 20	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 21	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 22	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 23	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 24	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 25	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 26	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 27	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 28	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 29	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 30	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 31	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 32	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 33	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 34	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 35	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 36	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 37	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 38	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 39	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 40	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 41	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 42	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 43	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 44	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 45	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 46	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 47	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 48	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 49	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria
Atabey Flash Hider 50	1000000 mm/s	1000000 mm/s	Checking criteria

Şekil 10. Atabey alev gizleyen modelinin akış analizi (Flow analysis of Atabey flash hider model)

3. Bulgular ve Tartışma (Findings and Discussion)

Milli ve yerli piyade tüfeği MPT-76' ya göre tasarlanarak katı modellemesi yapılan üç çeşit alev gizleyen modellenmiştir. Yapılan modellemelerin malzeme cinsine, fonksiyonlarına, tasarımlarına ve akış hesaplarına bakılarak bir tercih yapılmıştır. Bu tercih sonunda gerçekte malzeme bakımından uygulanması öngörülen, en dayanıklı olan ve kaplama gerektirmeyen titanyum malzemesinin seçilmesi öngörülmüştür. MPT-76' nın kullanıcı tarafından ateşlenmesiyle oluşan alev görüntüsünü özel tasarımı ile en iyi absorbe ederek dışarı çıkan ışığı minimize ederek kullanıcının konumunu gizleyen ve gece kullanımlarında kullanıcının gözlerini kör etmesini engelleyerek, gece görüşünü artıran, bu ana özelliklerinin yanında tel kesme ile kesici ve delici yapı özelliklerini barındıran Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modellemesi seçilmiştir. SolidFlow ile akış hesaplarına bakılıp diğer modellerinki ile karşılaştırma yapıldığında da en iyi sonucu veren Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelidir.

3.1. Üç Boyutlu Yazıcı ile Prototip Üretimi (Prototype Production with 3D Printer)

Milli ve yerli piyade tüfeği MPT-76' ya göre tasarlanan Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen katı modelimiz SolidWorks ile modellenerek üretim aşamasına geçilmiştir. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen katı modelini prototipini üretmek için günümüzde birçok yerde kullanılan üç boyutlu yazıcı teknolojileri kullanılmıştır. Atabey Alev Gizleyen katı modelini üç boyutlu yazıcı modellerinden Zortrax firmasının ürettiği M200 modeli kullanılarak prototipi üretilmiştir.

Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen katı modelinin prototipinin üretilmesinde kullanılan Zortrax M200 model yazıcı ile çok hassas ve yüksek verimlilikte parçalar prototip olarak çıkartılır. Üç boyutlu yazıcıda baskı kullanılan filamentler çok farklı renk seçeneklerine ve üst düzey özelliklere sahiptir. Çok hassas ve ayrıntılı parçalar üretilebilir ve özel tasarlanan yapılar orijinal halini hiç kaybetmeden olduğu gibi bastırılıp, çoğaltılabilir. Zortrax M200 modelinde iki adet yan kapaklar bulunmaktadır. Bu kapaklar ile tasarlanıp üretilmek istenen parçanın basılması sırasında sıcaklık dengesini sağlayarak daha kontrollü soğumaya olanak sağlar. Bastırılacak modeli dış etkenlere karşı korurlar. Aynı zaman da modelin basılması sırasında oluşabilecek yarıklar gibi hataların da önüne geçerler. Zortrax M200 modeli, kendisine özel Z-Suite sezgisel üç boyutlu baskı yazılımına sahiptir [20].

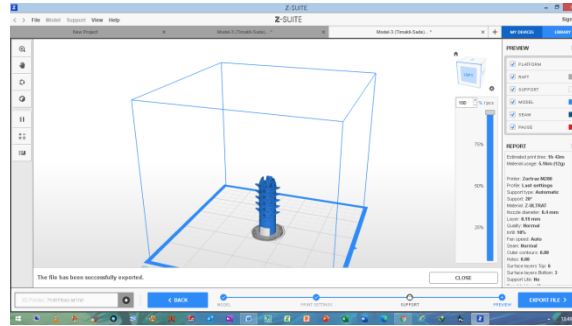


Şekil 11. Zortrax M200 3D yazıcının görüntüsü [21] (Image of Zortrax M200 3D printer)

Üç boyutlu yazıcı modeli olan Zortrax M200' ün kendisine ait düşüncel üç boyutlu katı model baskı yazılımıdır. Bu program ile programı.stl, .obj, .3mf, .dxf dosya bileşenleri üzerinden değişim, çıktı, düzeltme gibi işlemler uygulanabilir. Atebey Alev Gizleyen katı modeli oluşturulurken SolidWorks ile katı modellemesi oluşturulan yapı .stl uzantısı ile dosyalanarak kaydedilmiş ve son haliyle Z-Suite yazılımından çıktı ayarları yapılmıştır ve bu yazılım ile Atebey Alev Gizleyen modeli prototip imalata hazır hale getirilmiştir.

Z-Suite programı ile imalata hazırlana parça x,y ve z eksenlerinde üç boyutlu yazıcının tablası üzerinde istenilen yön ve şekilde konumlandırılabilir. Ayrıca baskı öncesi imal edilecek parçanın kalite, dolgu, kullanılacak filament, tabaka kalınlığı, baskı sırasında atılacak destekler, pervane hızı gibi pek çok özellik istenilen şekilde ayarlanabilir[22].

Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen katı modeli Z-Suite programına atılarak prototip imalatı için çıktı ayarları yapılmıştır. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen' in, Z-Suite programındaki baskı ön izleme ayarlarının görülebilmesi için katı modelin resmi Şekil 12' de gösterilmiştir.



Şekil 12. Atabey çok fonksiyonlu alev gizleyen, Z-Suite baskı ön hazırlama ayarları (Atabey multifunctional flash hider, Z-Suite print presets)

Z-Suite programında baskı ön hazırlama ayarları yapılan Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin dosyası bir SD kart ile yazıcıya gönderilmiştir. Tablo 1' de prototip olarak 3D baskı teknikleriyle üretilen Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeline ait parçanın isimlerini, sayıları, kullanılan filament miktarı, baskı süresi gibi temel veriler verilmiştir.

Tablo 1. Alev gizleyen modellerinin baskı temel verileri (Printing basic data of flash hider models)

Sıra No	Parçanın Adı	Parça Adeti	Parça Malzemesi (Filament)	İmalat Süresi (sa,dk)	Parça Malzeme Miktarı (gr)
1	Atabey Alev Gizleyen	1	Z-ULTRAT	1 sa 43 dk	12 gr

Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin prototipi imal edilmiştir. Şekil 13'te prototip görüntüsü verilmiştir. Model 0,1 mm tolerans ile imal edilmiştir. Parçada yapıştırılmalı bağlantı bulunmamaktadır. İmal edilen alev gizleyen modeli, tasarlanan ve modellenen ölçülerin 1/1 ölçüsünde prototipi üretilmiştir. Model 70 mm uzunluğundadır ve 7.62 mm kalibrelerde kullanılabilir.



Şekil 13. Atabey çok fonksiyonlu alev gizleyen prototipi (Atabey multifunctional flash hider prototype)

4.Sonuçlar (Results)

Yapılan bu çalışmada genel tasarım yöntemiyle yerli ve milli piyade tüfeği MPT-76 da kullanılmak üzere çok fonksiyonlu geliştirilmiş bir alev gizleyen katı modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan alev gizleyenin üç boyutlu yazıcı kullanılarak prototipi yapılmıştır.

MPT-76 da kullanılmak üzere modellenen Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli tasarımı için genel tasarım yöntemleri üzerinden yapılmıştır. Bu uygulamadaki temel adımlar izlenerek uygun modele ulaşılmıştır. Elde edilen uygun model ise, MPT-76 da kullanılmak üzere Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelidir. Genel tasarımla elde edilen MPT-76' da kullanılmak üzere tasarlanan üç adet alev gizleyen modellerinin çizimi ve katı modellemesinde Bilgisayar Destekli Programlar'dan olan SolidWorks kullanılmıştır. Daha sonrasında namı tasarımlanmış alev gizleyenlerin akış hesapları ve mukayesesi SolidFlow programı üzerinden yapılmıştır. Tasarımlanmış alev gizleyenlerin malzemesi, fonksiyonları, saha da kullanım dayanıklılığı ve akış hesaplarından en verimli olan Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli seçilmiştir. Tasarımlanmış seçilen Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli ile milli ve yerli piyade tüfeği MPT-76' da kullanılmak üzere, silah ateşlendiği namluda oluşan alev görünümünü minimize ederek özellikle gece kullanımlarında kullanıcının kör olmasının önüne geçilir ve gece görüşü artırılır. Ayrıca gece kullanımlarında kullanıcının konumunu gizlemeye yarar. Kendine özel tasarımı ve iç yapısı ile alev gizleme özelliğinin yanı sıra geri tepmeyi de azaltarak kullanıcının hem daha kolay silah kullanımını sağlar hem de hedef doğruluğunu artırır. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen' e eklenen özel opsiyon ile kesici ve delici dikenli yapılarıdır. Bu kesici ve delici dikenli yapılar ile kullanıcı olası müdafaa ve saldırı anlarında kolaylıkla ve hızlıca harekete geçme olanağı sağlar. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen' e eklenen bir diğer özel opsiyon olan dört turnak ile hem alev gizlemeye yardımcı olur hem de namı hizalanması ile tel kesme işlevi görür. Yapılan çalışmada MPT-76' da kullanılmak üzere çok fonksiyonlu geliştirilmiş bir alev gizleyen olan Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli tasarlanmıştır.

Tasarlanan üç boyutlu katı modelin prototip halinde üretilebilmesi için üç boyutlu yazıcı teknolojilerinden yararlanılmıştır. SolidWorks programında yapılan modelleme .stl dosyası olarak kaydedilerek üç boyutlu yazıcıya aktarılmıştır. Baskıda üç boyutlu yazıcı modeli olan Zortrax M200 ve Z-SUITE yazılı kullanılmıştır. Yazıcı malzemesi olarak Z-Ultrat kullanılarak tek bir parça halinde, beyaz renkte 1sa 43 dakikada ve 12 gr olarak imal edilmiştir.

Gerçeğiyle birebir aynı ölçülerde modelleme yapılarak prototip üretilmiştir. Yapılan çalışma ile savunma sanayi alanında binlerce konulardan bir tanesi olan ateşli silahların namı ucu parçaları için farklı bakış açısıyla öğrenmeye ve öğretmeye yönelik akılda kalıcı ve görsellerle dolu silah sistemleri eğitiminde faydalı bir eğitim materyali olacağı öngörülmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] Savunma Sanayii Müsteşarlığı, "2011-2016 Teknoloji Yönetim Stratejisi," Ankara: Savunma Sanayii Müsteşarlığı, 2011, pp. 15-35.
- [2] M. Bozdemir, "Picatinny rayı tasarımı ve 3b yazıcıyla prototip üretimi," *4 th International Congress On 3D Printing Technologies and Digital Industry, Antalya, Türkiye, 11-14 April 2019*, pp. 18-25.
- [3] O. Gündüzer, "Namlu cidarı boyutlandırılmasına iç balistik davranışın etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- [4] R. Öztürk, "İç Balistik," Ankara: MKEK Özel Yayınları, 1984, pp. 75-180.
- [5] Brown, "Flash hidere and the 1919a4 bmg," *Small Arms Review V17N2*, vol. 17, no. 2, pp. 14-21, 2013.
- [6] W. Perkins, "Ordu yeni bir tüfek kabul ediyor," *Popüler Mekanik*, vol. 109, no. 1, pp.145-149, 1958.
- [7] G. Rottman, "Kalaşnikof AK-47 Taarruz Tüfeği," Londra: Osprey Yayıncılık, 2011, pp. 35-75.
- [8] VJM. Di Maio, "Ateşli Silah Yaraları, Ateşli Silahlar, Balistik ve Adli Tekniklerin Pratik Yönleri," Boca Raton: CRC Basın, 1999, pp. 187-228.
- [9] Army Material Command, "Engineering Desing Handbook Guns Series Muzzle Devices," New York: United States, New York, 1968, pp. 52-187.
- [10] Petzl, "Tehlikedeki gelenek," *Alan ve Akış*, vol. 99, no. 2, pp. 26-30, 1994.
- [11] J. Nixon, "Forensic Engineering Analysis of Firearm Silencers," *Journal of the National Academy of Forensic Engineers*, vol. 25, no. 2, pp. 3-19, 2009.
- [12] H. Mark, W. Kennewick and B. Gerald, "Flash suppressor," US. Patent No:4.893.544, Jan. 16, 1990.
- [13] H. Alli ve D. Tuncer, "Ağır silah geri tepme mekanizması tasarımı iç balistik modelinin oluş. ve kama kuv. hes.," *2. Ulusal Tas. İm. ve Anl. Kongresi, Balıkesir, Türkiye, 11-12 Kasım 2010*, ss 135-148.
- [14] Anonim, "MPT-76 modeli", www.free3d.com, [Online]. Available: <https://free3d.com/tr/3d-model/mpt-76-infantry-rifle-3027.html>. [Accessed: May.15,2022].
- [15] N. Ay ve M. Bozdemir, "Füze sistemleri tasarımı için kavramsal tasarım uygulaması," *1 st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials, Karabük, Türkiye, 22-24 March 2018*, ss. 169-170.
- [16] Barnatt, "3D Printing," England: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016, pp. 75-120.
- [17] J. Micallef, "Beginning Design For 3D Printing," Kaliforniya: Apress, 2015, pp. 18-38.
- [18] B. Evans, "Practical 3D Printers: The Science and Art Of 3D Printing," Kaliforniya: Apress, 2012, pp. 38-95. R. Noorani, "3D Printing: Technology Applications and Selection," England: CRC Press, 2017, pp. 145-180.
- [19] H. Özaslan ve M. Bozdemir, "Alev gizleyen tasarımı ve 3D yazıcı ile prototip imalatı," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 6, no. 1, pp. 176-185, 2022. doi:10.46519/ij3dptdi.1088155
- [20] Anonim, "Zortrax M200 üç boyutlu yazıcının görüntüsü," www.poligonmuhendislik.com, [Online]. Available: <https://www.poligonmuhendislik.com/magaza/zortrax-m200-plus-3d-printer>. [Accessed: May.15,2022].
- [21] M. Bozdemir, "Silah mekanik sistemleri için 3 boyutlu eğitim modellerinin geliştirilmesi", *Internadtional Symposium on 3D Printing Technologies, Istanbul, Türkiye, 5-8 Mayıs 2016*, pp. 91-100.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Gyroscopic Vibration Damper for One-Storey Building: Theoretical and Experimental Research

Faruk Ünker^a, Olkan Çuvalcı^b

Submitted: 09.09.2022 Revised: 21.11.2022 Accepted: 03.12.2022 doi:10.30855/gmbd.0705034

ABSTRACT

Keywords: Vibration control, gyroscope, gyrostabilizer, vibration absorbers, nonlinear dynamics, damping

^a Gümüşhane University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
29100 - Gümüşhane, Türkiye
Orcid: 0000-0002-9709-321X
e mail: farukunker@gumushane.edu.tr

^b Karadeniz Technical University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
61080 - Trabzon, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8596-5941

*Corresponding author:
farukunker@gumushane.edu.tr

In this study, a gyroscopic damper model consisting of a built-in column has been developed. The objective of this study is determining the required angular momentum with the optimum ratio of natural frequency for the gyroscopic vibration absorber under sinusoidal excitation. This damper model is investigated experimentally and theoretically for different angular momentums of the gyroscope and different frequency ratios of the structure and damper on a single-story structure. As a result of the study, the displacement of the structure at the 1st mode frequency for a given angular momentum of the gyroscope is fairly reduced. Besides, at a notable frequency ratio of the damper and the structure, the effect of the angular momentum is improved. Even if the disk mass of the gyroscope decreases, it is possible to obtain a certain angular momentum by increasing the disk speed. Thus, lighter and less bulky gyroscopic vibration dampers can be designed. The cooperation of the required angular momentum with the optimum ratio of natural frequencies should be considered to obtain a highest attenuation of the building vibration. In addition, the equations of motion obtained according to the 1st mode and the theoretical results overlapped.

Bina için Jiroskopik Titreşim Sönümleyici: Teorik ve Deneysel Araştırma

ÖZ

Bu çalışmada, kolon üzerine bağlanmış bir jiroskopik sönümleyici modeli üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmanın amacı, sinüzoidal zorlayıcı yük altında jiroskopik titreşim sönümleyici için gerekli açısız momentum ile optimum doğal frekans oranı belirlenmesidir. Bu sönümleyici modeli, tek katlı bir yapı üzerinde jiroskopun farklı açısız momentumları ve yapı ile sönümleyicinin farklı frekans oranları için deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, jiroskopun belirli bir açısız momentumu için yapının 1. mod frekansında yer değiştirmesi oldukça azaltılmıştır. Ayrıca, sönümleyici ve yapının belli bir frekans oranında açısız momentumun etkisi iyileşmiştir. Jiroskopun disk kütlesi azalsa dahi disk hızını artırarak belirli bir açısız momentum elde etmek mümkündür. Böylece daha hafif ve daha az hacimli jiroskopik titreşim sönümleyici tasarlanabilir. Bina titreşiminde en yüksek sönümleme elde etmek için, gerekli açısız momentumun ile optimum doğal frekans oranı ile bağlantısı hesaba katılmalıdır. Ayrıca 1. moda göre elde edilen hareket denklemleri ile teorik sonuçlar örtüşmüştür.

Anahtar Kelimeler: Titreşim kontrolü, jiroskop, jirostabilizer, titreşim yutucu, doğrusal olmayan dinamikler, sönümleme

1. Introduction

In conditions where the natural frequency of the main building is very close to the frequency band of the force forcing this building, resonance that causes large displacements occurs [1]. Dynamic dampers are sub-systems that absorb most of the energy of the main structure by transferring them to prevent resonance [2], [3]. Dynamic dampers are generally evaluated in three categories: passive, active, and hybrid. Until today, many dynamic dampers, both passive and active, that can meet external loads such as earthquakes and wind, have been applied to various structures [4].

Passive vibration dampers do not need external energy to dampen. On the contrary, they get their kinetic energy from the movement of the structure to be damped [1]. These systems are low cost as they do not require extra energy and actuator to dampen the main structure. Passive dampers are preferred due to their low cost and simple technology. However, passive vibration dampers need the vibration (displacement) of the structure to be damped to work [1]. This causes the system to work late and act dependent on the main structure. In passive control methods, the system cannot respond to variable vibration loads because the damper is adjusted according to the resonance region of the main structure [1]–[3].

Active dampers consist of sensors that measure the vibrations affecting the structure and computer that analyses the measured data from the sensors, and actuators that generate the necessary control forces according to the analysis obtained [2]–[4]. It can always respond quickly to changing external effects in active control methods. However, the technology used in active control systems is costly and requires large-scale external energy [2], [3]. There are negative situations in both active and passive vibration dampers. Therefore, to get rid of the disadvantages of both types of dampers, hybrid dampers have been developed in which both dampers are used together [1]–[4].

Today, gyroscopic stabilizers are widely researched in different fields [5]–[12]. In its simplest form, the gyroscope consists of a rotating disk around a certain axis and a gimbal in which the disk is placed. Active control moment gyro is more effective in damping vibration, although a passive gyroscope gives better results in terms of energy consumption. Compared to conventional active mass dampers, using gyroscopic vibration dampers to reduce vibrations provides weight and volume savings. In another study, Ünker and Çuvalcı [5] theoretically investigated the effect of gyroscopic vibration dampers in flexible structures under seismic effects and showed that the amount of bending of the flexible structure decreased. Çuvalcı et al. [6] investigated the gyroscopic vibration damper as a passive vibration damper in a 0.5-meter beam under the effect of harmonic load. In this theoretical and experimental study, the equations of motion are derived from the energy equations of the beam and the control moment gyroscope with the help of the Lagrangian method. The analysis of the equations of motion of the system is simplified to ordinary differential equations by using the first mode (effective mode) approach. In their numerical studies, they observed that the gyroscopic vibration damper effectively absorbs the vibrations of the cantilever beam. Ünker [9]–[11] also examined the control moment gyroscope in terms of dynamics and control of vehicle systems. Thanks to the gyroscopes he applied to the two-wheeled robot, he managed to keep the balance of the robot stable and under constant load [9]. In his work, he also derived the optimum velocity relation by applying certain harmonic functions to the equations of motion. Thanks to the control torques applied by the gyroscopes to the gimbal, it not only eliminated the reaction forces but also kept the robot's body in balance with a very small oscillation. In another study, Ünker [10] theoretically examined the gyroscopic stabilizer on a heavy-duty vehicle. Soleymani and Norouzi [12] theoretically investigated the gyroscopic damper they developed to dampen the vibrations on the multi-megawatt wind turbine and they succeeded in increasing the damping effect of the gyroscope by using a controller. The most important advantage of this active gyro damper is that a PID and Fuzzy controlled torque is applied externally to the gyroscope's gimbal to control the gyroscope's angular momentum. According to the results obtained, the control moment gyroscope has shown that the classical linear dampers can perform all their duties, recover faster, and operate at wide damping ratios. It has also shown that, like the two-wheeled robot, the truck trailer can remain in balance under constant and continuous load without external support. In addition to being used as a control moment gyroscope vibration damper, it can also be used as a stabilizer under a constant and continuous load without the help of any external force.

This research, it is aimed to dampen a single-storey structure by using the angular momentum of the gyroscope, which is designed as a hybrid damper. In its simplest form, the gyroscope consists of a rotor

that rotates in a ball bearing. The most important parameter of the gyro motion is based on the conservation rule of angular momentum [1]. Therefore, even if the rotor mass of the gyroscope decreases, its angular momentum can be increased if the rotor speed is increased. Thus, lighter and less bulky dampers can be designed compared to conventional dampers. For the theoretical and experimental research of the gyroscope vibration damper on a single-storey structure, the gyroscope-bearing recessed column model was used. In the theoretical research, the motion equations of the system (partial differential equations) were obtained by substituting the kinetic and potential energy equations describing the main structure and the damper in the Lagrangian equation. The obtained equations of motion are simplified to ordinary differential equations with integral constants by using the first mode approach.

2. Model Set-Up Design

The schematic model of the test setup is shown in Figure 1. The single-storey building in the experimental setup basically consists of two main parts. The first part consists of a gyroscope and a flexible steel column that carries the gyroscope and rises from the upper block of the building. The second part is a single-story structure, which consists of four flexible columns carrying the upper block, fixed from the other end to the lower block (ground of the lower floor). The floor plate of the single-story building is mounted by sitting on two parallel liner slides so that the desired displacement movement can only be made in the horizontal direction. All other physical data of the test model are given in Table 1. As seen in Figure 1, the motion coming from the shaker with a certain frequency and amplitude is transmitted horizontally to the floor of the single-story building model. The displacement amplitudes of the shaker and the frequency increment control in scanning were performed using the Brüel & Kjaer / LDS CometUSB vibration controller. In all experimental and theoretical studies, harmonic acceleration, linear scanning type, and 0.001 Hz/second increment rate were selected and kept constant.

In Figures 1 and 2, an aluminum plate with mass of M_{2t} is attached to the free end of four vertical cantilever beams at length of L_2 . All those the other end of the beams are fixed to the aluminum base plate that is attached to the shaker with solid metal lever. Therefore, the base plate of the one story building's test model excites by shaker harmonically with varying forcing frequencies (ω) and amplitudes (z_0) by the base excitation of $z = z_0 \cos(\omega t)$. Beams are initially assumed straight and beams horizontal and vertical displacements are also assumed elastic.

Table 1. Physical properties of the test model [8]

<i>Symbol</i>	<i>Model values</i>	<i>Model Descriptions</i>
ρ	7850 kg/m ³	Steel density
z_0	0.005 m	Excitation amplitude
E	210e9 N/m ²	Young's modulus
L_1	0.14 m	Length of the gyro carrier beam
L_2	0.20 m	Height of the one-story building
M_1	0.65 kg	Tip mass of the gyro carrier beam
M_2	2.75 kg	Tip mass of the one-story building
m_f	0.311 kg	Mass of the gimbal
I_1	2.5333e-11	Mass moment of inertia of gyro beam
I_2	3.3667e-11	Mass moment of inertia of storey
I_t	1e-2 kg.m ²	Tip mass moment of gyro-beam inertia
I_{2t}	12e-2 kg.m ²	Tip mass moment of storey inertia
A_1	7.6000e-5 m ²	Area of gyro beam
A_2	1.7600e-4 m ²	Total area of storey beams
R	0.04 m	Centroid radius of the gimbal
g	9.81 m/s ²	Gravitational acceleration
k_g	0 N.m /rad	Torsion spring stiffness of gyro
c_g	0.0005 N.m.s/rad	Damper coefficient of gyro
m	0.023-0.115 kg	Disk mass
r	0.05 m	Disk radius
I_p	(mr ²)/2+2.66e-5 kg.m ²	Disk's rotary inertia
I_o	(mr ²)/4 kg.m ²	Disk inertia of mass moment
I_{fx}	6.74 e-4 kg.m ²	Gimbal inertia of mass moment
I_{fy}	6.29 e-4 kg.m ²	Gimbal inertia of mass moment
I_{fz}	3.60 e-4 kg.m ²	Gimbal inertia mass moment
Ω	0-10000 rpm	Disk rotating speed

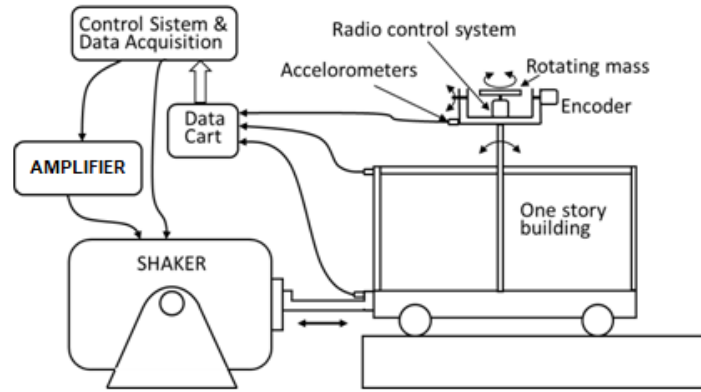


Figure 1. Experimental set-up [8]

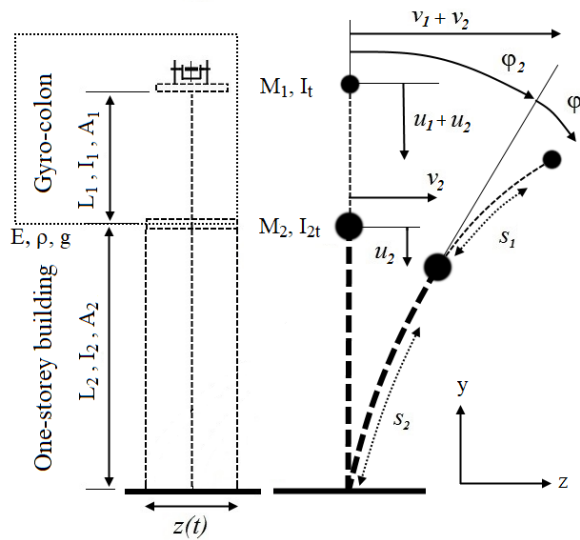


Figure 2. One-Storey building mathematical model [8]

2.1. Mathematical Model

The horizontal displacements of gyro-beam and one-storey building at the free end represent by v_1 and v_2 , respectively. Here, s_n indicates the extent along the arc-length of the column because of elastic deformation of the column (where $n=1,2$). The gyro beam absorber consists of rotating mass (disk) that is attached to the gimbal through the electrical motor are mounted to top of flexible beam as seen in Figure 2. The rotating disk mass and disk angular velocity are represented with m and Ω respectively. The orientation angle of the beam was given as [13]–[15].

$$\phi(s_n, t) = \sin^{-1} v'_n \approx v'_n + \frac{1}{6} v_n'^3 \tag{1}$$

Since tip masses of test model are significantly larger than the beam masses, the beam deflection can be expressed with the following shape function for the first mode, $\psi(s_n)$ [16].

$$v(s_n, t) = v(t)\psi(s_n) \tag{2}$$

Where,

$$\psi(s_n) = 1 - \cos\left(\frac{\pi s_n}{2L_n}\right) \tag{3}$$

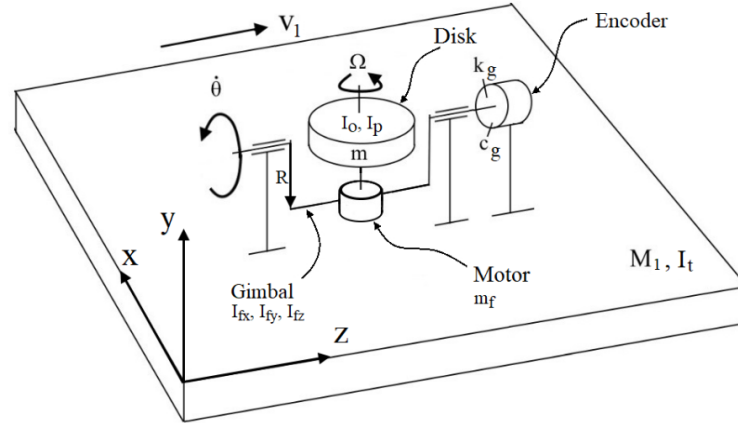


Figure 3. Gyro model with the encoder [8]

By using Lagrange's equation then making some mathematical manipulations, equations of motion of the gyro-column, the single-storey, and gyroscope at the free end are obtained as follow respectively [8]

$$\begin{aligned} & \left[C_1 + C_2 v_1^2 + C_3 v_1^4 + \left(\frac{(I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta}{+(I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta} \right) \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right)^2 \right] \ddot{v}_1 \\ & + \left[C_2 + 2C_3 v_1^2 + G_5^3 \left(\frac{(I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta}{+(I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta} \right) \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \right] v_1 \dot{v}_1^2 \\ & + \left\{ C_4 + C_5 v_1^2 + C_6 v_1^4 + C_7 (v_2 \ddot{v}_2 + \dot{v}_2^2) \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} I_t \left[\ddot{v}_2 G_{15} + \frac{1}{2} v_2 (v_2 \ddot{v}_2 + 2\dot{v}_2^2) G_{15}^3 \right] G_5^3 v_1 \right\} v_1 \\ & + \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{I_{fy} - I_{fx}}{+I_p - I_o} \right) \left[\left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \dot{v}_1 \right. \\ & \left. + \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \dot{v}_2 \right] \theta \sin 2\theta \\ & + \left(\frac{(I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta}{+(I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta} \right) \left[\ddot{v}_2 G_{15} + \frac{1}{2} v_2 (v_2 \ddot{v}_2 + 2\dot{v}_2^2) G_{15}^3 \right] \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \\ & + I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta \end{aligned} \right\} \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \tag{4} \\ & = -\gamma_1 (\ddot{v}_2 + \ddot{z}) - I_t \left[\ddot{v}_2 G_{15} + \frac{1}{2} v_2 (v_2 \ddot{v}_2 + 2\dot{v}_2^2) G_{15}^3 \right] G_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[C_8 + C_9 v_2^2 + C_{10} v_2^4 + \left(\begin{array}{l} (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \\ + (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \end{array} \right) \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right)^2 \right] \ddot{v}_2 \\
 & + \left[C_9 + 2C_{10} v_2^2 + G_{15}^3 \left(\begin{array}{l} (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \\ + (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \end{array} \right) \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \right] v_2 \dot{v}_2^2 \\
 & + \left\{ \begin{array}{l} C_{11} + C_{12} v_2^2 + C_{13} v_2^4 + C_7 (v_1 \ddot{v}_1 + \dot{v}_1^2) \\ + \frac{1}{2} I_t \left[\ddot{v}_1 G_5 + \frac{1}{2} v_1 (v_1 \ddot{v}_2 + 2\dot{v}_1^2) G_5^3 \right] G_{15}^3 v_2 \end{array} \right\} v_2 \\
 & + \left. \left(\begin{array}{l} (I_p - I_o) \left[\dot{v}_1 \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \right] \\ + (I_{fy} - I_{fx}) \left[\dot{v}_2 \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \right] \end{array} \right) \dot{\theta} \sin 2\theta \right\} \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \\
 & + \left. \left(\begin{array}{l} (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \\ + (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \end{array} \right) \left[\ddot{v}_1 G_5 + \frac{1}{2} v_1 (v_1 \ddot{v}_1 + 2\dot{v}_1^2) G_5^3 \right] \right\} \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \\
 & + I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta \\
 & = -\gamma_1 \ddot{v}_1 - \gamma_2 \ddot{z} - I_t \left[\ddot{v}_1 G_5 + \frac{1}{2} v_1 (v_1 \ddot{v}_1 + 2\dot{v}_1^2) G_5^3 \right] G_{15}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 & (I_o + I_{fx}) \ddot{\theta} - \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} \dot{v}_1 \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \\ + \dot{v}_2 \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \end{array} \right]^2 (I_{fy} - I_{fx} + I_p - I_o) \sin 2\theta \\
 & - \left[\begin{array}{l} \dot{v}_1 \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \\ + \dot{v}_2 \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \end{array} \right] I_p \Omega \cos \theta + k_g \theta + c_g \dot{\theta} + m_f g R \sin \theta = 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

Where,

$$C_1 = M_1 + I_t G_5^2 + \rho A_1 G_1$$

$$C_2 = \rho A_1 G_3 + I_t G_5^4 + M_1 G_4^2$$

$$C_3 = \frac{1}{4} I_t G_5^6$$

$$C_4 = -M_1 g G_4 + E I_1 G_6 - \rho A_1 g G_9$$

$$C_5 = 2EI_1G_7$$

$$C_6 = \frac{3}{4}EI_1G_8$$

$$C_7 = \rho A_1 G_9 G_{14} + M_1 G_4 G_{14}$$

$$C_8 = \rho A_1 L_1 + \rho A_2 G_{11} + M_1 + M_2 + (I_t + I_{2t}) G_{15}^2 \quad (7)$$

$$C_9 = \rho A_2 G_{13} + (M_1 + M_2) G_{14}^2 + \rho A_1 G_{14}^2 + (I_t + I_{2t}) G_{15}^4$$

$$C_{10} = \frac{1}{4} G_{15}^6 (I_t + I_{2t})$$

$$C_{11} = EI_2 G_{16} - \rho A_1 g G_{14} L_1 - \rho A_2 g G_{19} - (M_1 + M_2) g G_{14}$$

$$C_{12} = 2EI_2 G_{17}$$

$$C_{13} = \frac{3}{4} EI_2 G_{18}$$

$$\gamma_1 = \rho A_1 G_2 + M_1$$

$$\gamma_2 = \rho A_1 L_1 + \rho A_2 G_{12} + M_1 + M_2$$

z is the base displacement of one storey building ($z = z_0 \cos(\omega t)$). By putting zero into equation (4), (5) and (6) for $\dot{v}_1, \dot{v}_2 \approx 0$ and $\dot{\theta} \approx 0$, the equations are reduced. Assume $\theta=0$ for small vibrations. Respectively, the natural frequencies of gyro-beam, the storey and gyro can be shown as follows [8];

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{C_4}{C_1 + G_5^2 (I_o + I_{fx})}} \quad (8)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{C_{11}}{C_8 + G_{15}^2 (I_o + I_{fx})}} \quad (9)$$

$$\omega_g = \sqrt{\frac{m_f g R + k_g}{I_o + I_{fx}}} \quad (10)$$

2.2. Model Test Set-Up

The experimental model set-up is given in Figure 4 and the physical parameters of the test model are representing in Table 1. The primary structure is a solid rectangular aluminium block supported by 1 mm thick 25 mm wide four steel spring beams. The gyroscopic vibration absorber also consists of electric motor (1800Kv / 875w NTM Prop Drive Series 35-36A), which is remotely controlled with a

radio control system (FlySky FS-T6B), mounted in a gimbal by assembling to the free end of a vertical cantilever column. This gyro carrier beam is attached to the base of the primary mass by a rigid clamp for researching the horizontal and vertical displacements. The base of the model is restrained to horizontal motion by the use of four bearings moving on a smooth flat surface. The sinusoidal displacement is horizontally applied to the base of the main structure via a rigid joint.

A vibration test system (Brüel & Kjaer / LDS Comet USB) was used to sweep the frequency responses of the one-story building by the channel of multiple mode (SCO-02V-01) and tracking filters (SCO-02V-02). The shaker control system consists of two primary components: (1) the hardware and (2) Windows-based application software. The shaker control system performs data measurement and drive signal generation. The signal rides a 311 N electrodynamic shaker (LDS V450). The shaker system can provide for varying amplitudes and frequencies of excitation. The shaker operates between the frequency range of 1.2 to 7500 Hz from either a sine wave or random signal input. V450 shaker is driven by the ling dynamic systems (PA500L amplifier). The V450 model is fitted with a low impedance armature, which is suited for use with the PA500L amplifier. During the experiments, the computer was used to store, display, and analyze experimental data.

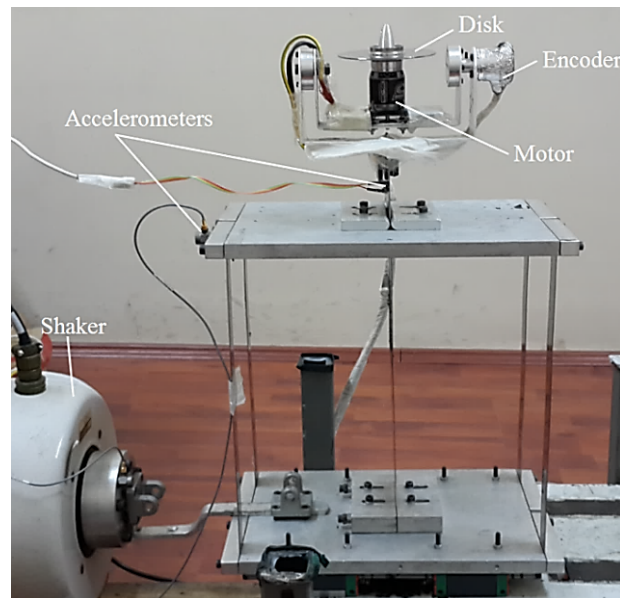


Figure 4. Experimental model of the cantilever model with the one-story building and gyroscope [8]

For the sinusoidal excitation experiments, the accelerometers were used as transducers to monitor the displacement response of the one-story building and the gyroscope carrier beam (Figure 4). One accelerometer (3-Axis Accelerometer - MMA7341L) was attached to the gyro carrier beam of the gyroscopic vibration absorber, while the other one (DeltaTron accelerometers - Type 4513) was attached to the top table of the primary mass. An accelerometer (DeltaTron accelerometers - Type 4513) was stuck to the table of the shaker to monitor its motion to send a feedback signal to the vibration controller of the output signal of the shaker. The signals from the accelerometers on the primary structure and absorber, and the accelerometer on the shaker were fed into the data acquisition and analysis system. Additionally, an incremental encoder (RI 30-O) was mounted onto the gyroscope to measure the signal of the angular motion of the gimbal.

3. Results and Discussion

3.1. Theoretical Results

In order to obtain the optimum operating conditions, the investigations are carried out with the different frequency ratios of the one-story building, but the frequency (ω_2) of the one-story building has been considered to be constant in the system. The gyro has been shaped with $\omega_g = \omega_2$, $\omega_g = 1.2\omega_2$, and $\omega_g = 2\omega_2$, respectively. Here, natural frequency of one story building ω_2 and natural frequency of the gyro ω_g . As seen from the response curves for these frequency ratios by the base excitation of $z=$

$z_0 \cos(\omega t)$ in Figures 5-7, the ratio of $\omega_g = 1.2\omega_2$ is more effective throughout the varying rotor speeds. The tip displacement of the storey can be fairly decreased if the angular momentum is $L_\Omega = 0.0660 \text{ kg.m}^2/\text{s}$ at $\Omega = 4000 \text{ rpm}$. So, the optimal performance was achieved at the ratio of $\omega_g = 1.2\omega_2$ with $\Omega = 4000 \text{ rpm}$ which generated less displacement by comparison.

Consequently, throughout the next entire analysis the height of the one-story building model for $\omega_g = 1.2\omega_2$ with an optimum angular momentum ($L_\Omega = 0.0660 \text{ kg.m}^2/\text{s}$) is preferred as an optimum frequency ratio.

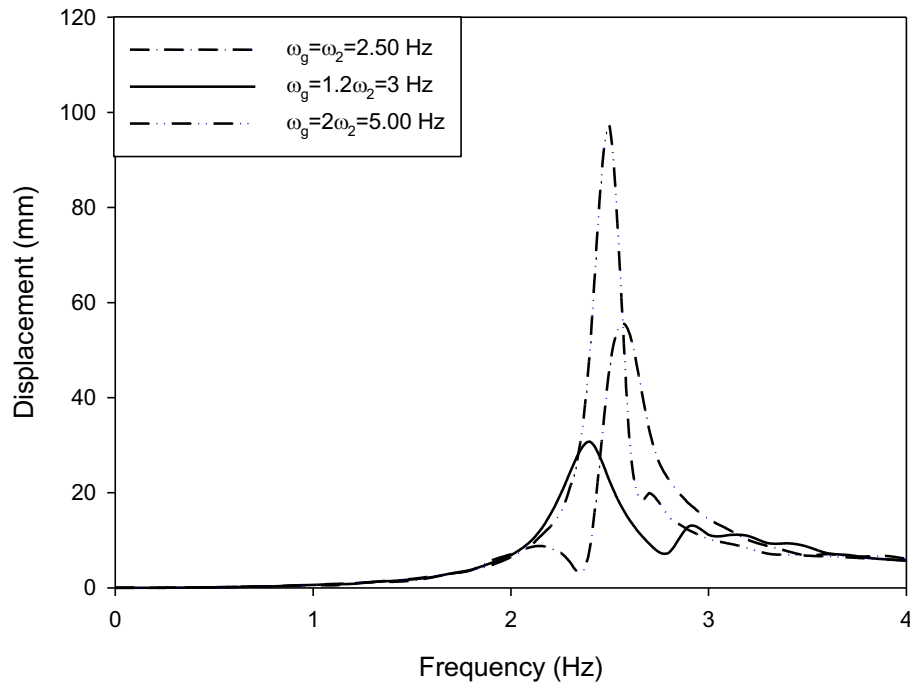


Figure 5. Theoretical response curves for varying frequency ratios by the base excitation of $z = z_0 \cos(\omega t)$. ($\Omega = 2000 \text{ rpm}$, $\omega_2 = 2.5 \text{ Hz}$, $\omega_1 = 7.5 \text{ Hz}$, $z_0 = 5 \text{ mm}$, $m = 0.069 \text{ kg}$) [8]

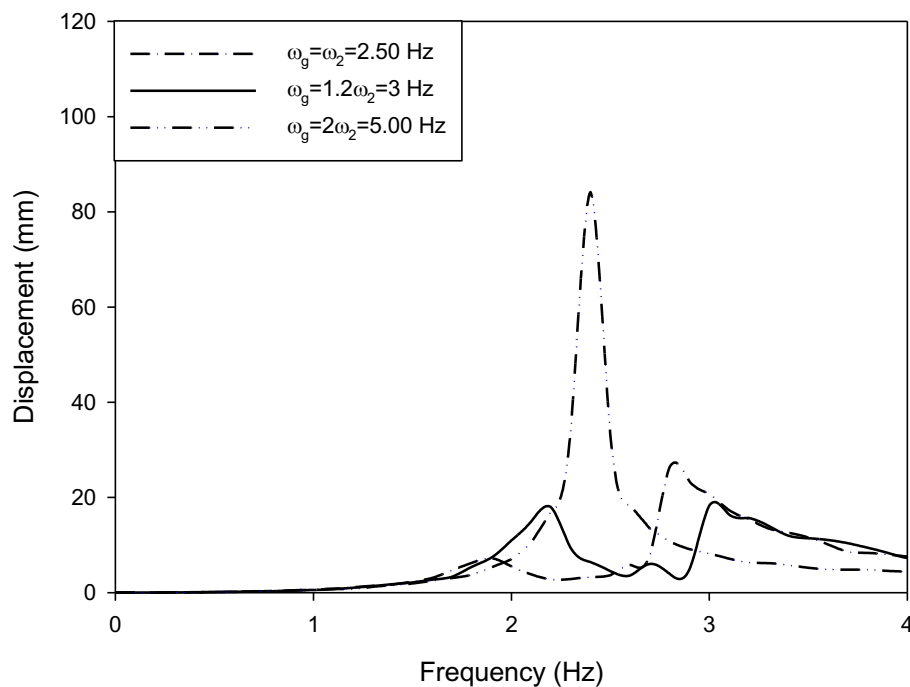


Figure 6. Theoretical response curves for varying frequency ratios by the base excitation of $z = z_0 \cos(\omega t)$. ($\Omega = 4000 \text{ rpm}$, $\omega_2 = 2.5 \text{ Hz}$, $\omega_1 = 7.5 \text{ Hz}$, $z_0 = 5 \text{ mm}$, $m = 0.069 \text{ kg}$) [8]

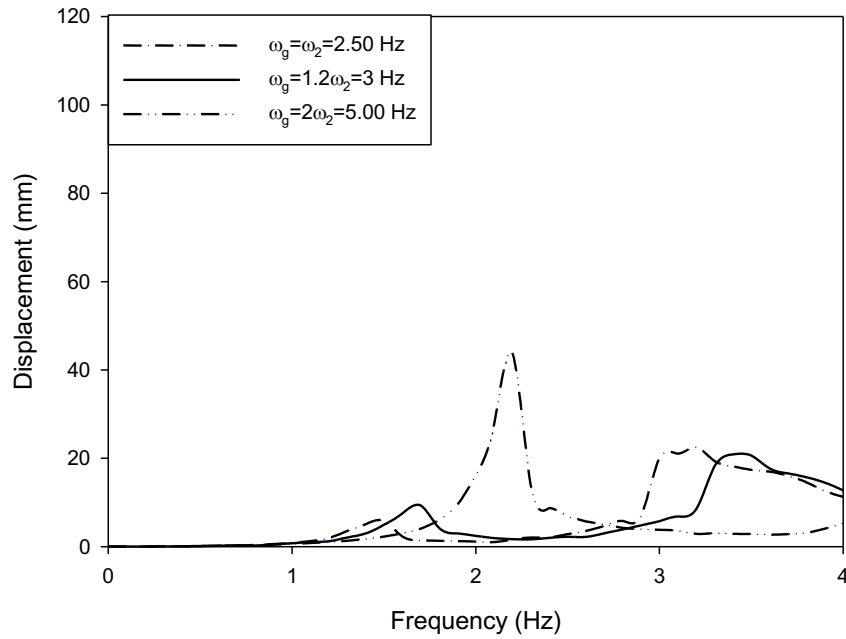


Figure 7. Theoretical response curves for varying frequency ratios by the base excitation of $z = z_0 \cos(\omega t)$. ($\Omega = 8000$ rpm, $\omega_2 = 2.5$ Hz, $\omega_1 = 7.5$ Hz, $z_0 = 5$ mm, $m = 0.069$ kg) [8]

3.2. Experimental Results for the Frequency Ratio, $\omega_g = 1.2\omega_2$ of the One-Story Building

3.2.1. Results for different disk masses (m)

By the base excitation of $z = z_0 \cos(\omega t)$, Figure 8 represents frequency scan of the displacement curves of the one-storey building for varying disk masses (m) of gyro. It can be seen that tip responses of the one-storey building is slightly changed within range of $m = 0.023$ - 0.115 kg. So the inertia on the frequency response can be ignored for this range of disk mass with $\Omega = 0$ rpm.

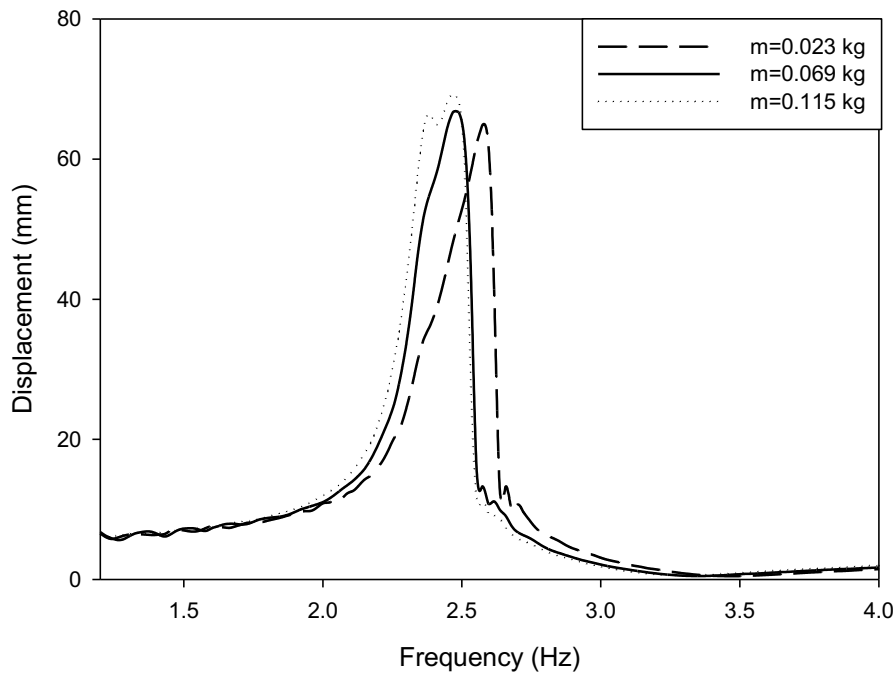


Figure 8. Frequency sweep curves of the one-storey building for varying disk masses (m) by the base excitation of $z = z_0 \cos(\omega t)$. ($z_0 = 5$ mm, $\Omega = 0$ rpm and $\omega_g = 1.2\omega_2$) [8]

Figures 9 and 10 show the frequency scan for varying disk masses (m) of case $\Omega = 3000$ rpm. It presented that the displacement amplitude is reduced by increasing the disk mass at the first resonant

frequency mode. However, there is the existence of two vibration peaks outside the first mode frequency. These peaks move towards opposing frequency directions. The amplitude of one peak by low frequency decreases when the other peak increases as the disk mass increased. Up to a value of disk mass there is significantly suppression in the vibration. But beyond this, as the disk mass is increased, the reduction of the vibration is slightly changed. Similar change in sweep pattern is also observed changing disk speed as shown in Figures 11-12.

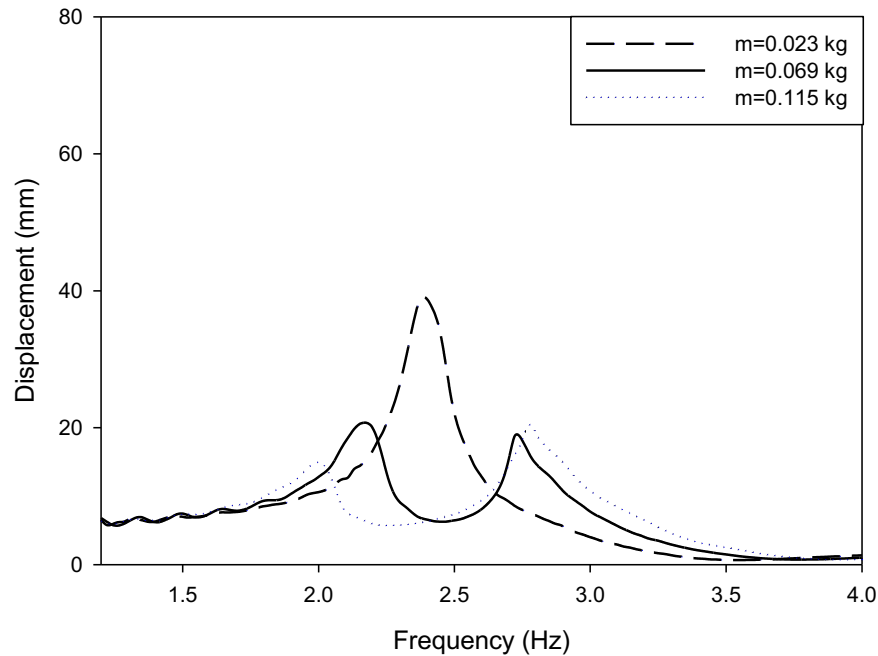


Figure 9. Frequency sweep curves of the one-storey building for varying disk masses (m) by the base excitation of $z = z_0 \cos(\omega t)$. ($z_0 = 5 \text{ mm}$, $\Omega = 3000 \text{ rpm}$ and $\omega_g = 1.2\omega_2$) [8]

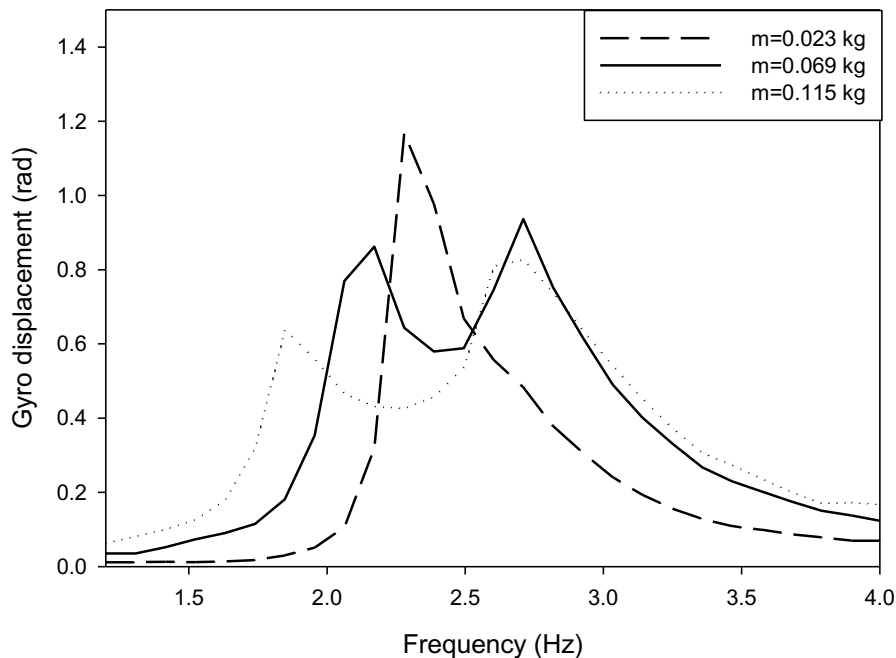


Figure 10. Frequency sweep curves of gyroscope for varying disk masses (m) by the base excitation of $z = z_0 \cos(\omega t)$. ($z_0 = 5 \text{ mm}$, $\Omega = 3000 \text{ rpm}$, $\omega_g = 1.2\omega_2$) [8]

3.2.2. Results for different disk speeds (Ω) of gyro

Figures 11-12 show the frequency sweep displacements for varying disk speeds (Ω) for case $m = 0.069 \text{ kg}$. The gyro-beam system has significantly reduced the displacement as we increase the disk speed. The existence of two vibration peaks which move towards opposing frequency directions is found to

decrease the amplitude of displacement compared to the other peak as the disk speed is increased. So, the intersection of these peaks (at $\omega=2.10$ Hz and $\omega=2.85$ Hz) as seen in Figure 13 results in optimum disk speed of gyro. Up to this value there is significantly suppression in the vibration at $\omega=2.45$ Hz. But beyond this, as the disk speed is increased, the vibration at $\omega=2.85$ Hz is increased compared to the other peaks. So, the displacement amplitude of the story can be considerably decreased when the angular momentum is $L_\Omega=0.0660$ kg.m²/s at $\Omega = 4000$ rpm.

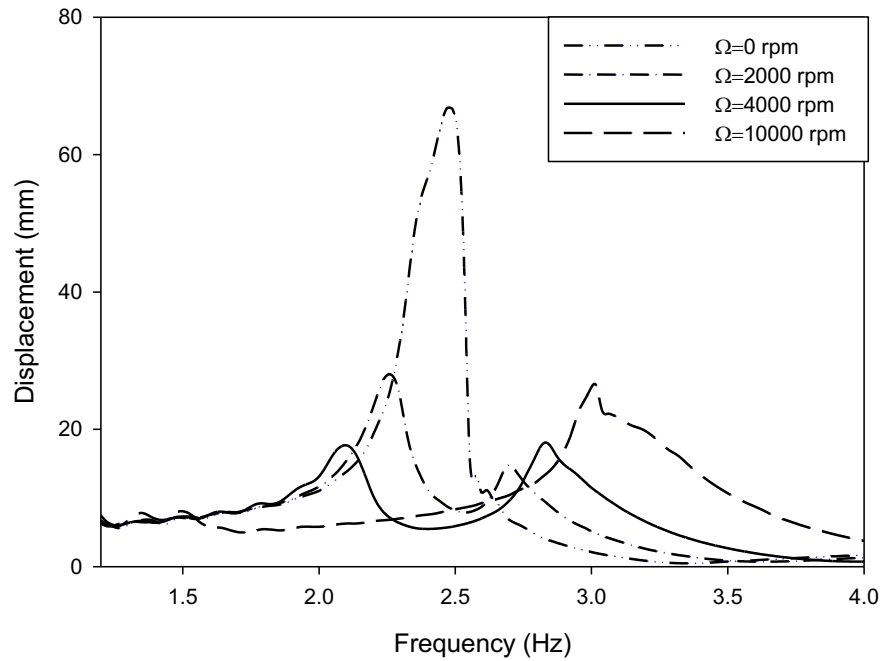


Figure 11. Frequency sweep curves of the one-storey building for varying disk speeds (Ω) by the base excitation of $z= z_0\cos(\omega t)$. ($z_0=5$ mm, $m=0.069$ kg and $\omega_g = 1.2\omega_2$) [8]

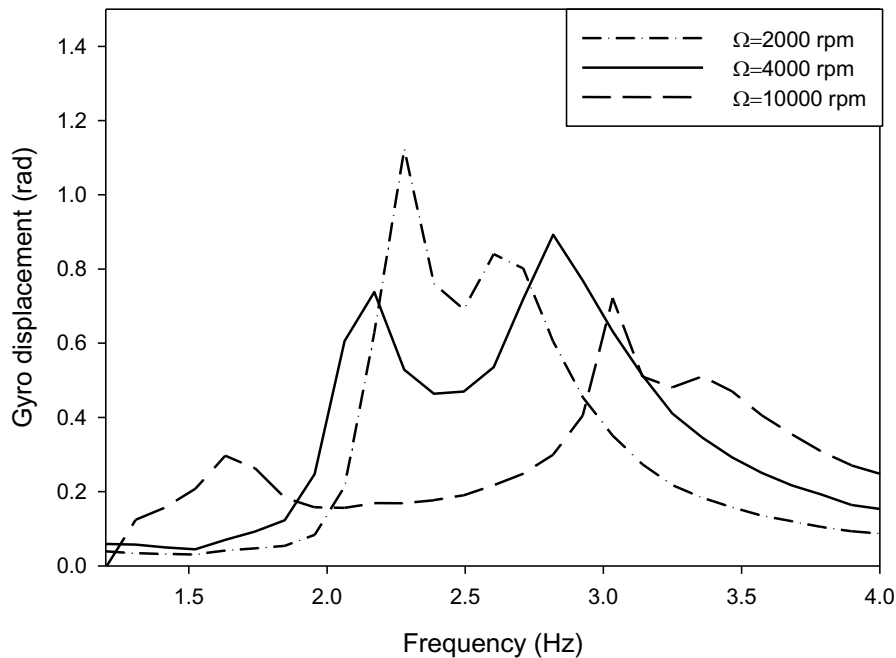


Figure 12. Frequency sweep curves of gyroscope for varying disk speeds (Ω) by the base excitation of $z= z_0\cos(\omega t)$. ($z_0=5$ mm, $m=0.069$ kg and $\omega_g = 1.2\omega_2$) [8]

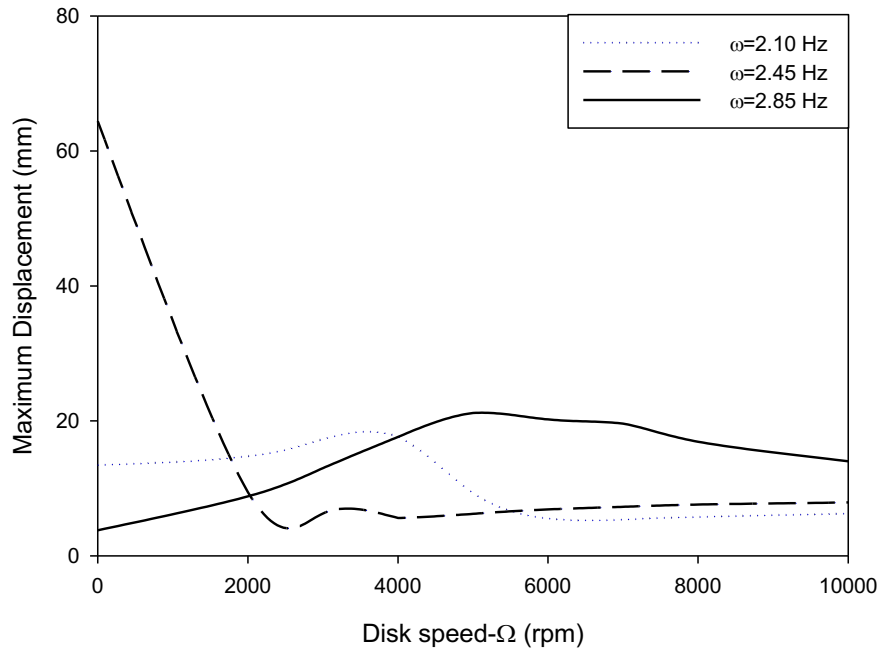


Figure 13. Disk speed response curves of the one-storey building for different base excitation frequency (ω) with $z= z_0\cos(\omega t)$. ($z_0=5$ mm, $m=0.069$ kg and $\omega_g = 1.2\omega_2$) [8]

3.2.3. Instantaneous results when the gyroscope is suddenly activated

Figure 14 represents the frequency response curves of different excitation frequencies (ω) with the base excitation of $z= z_0\cos(\omega t)$. Instantaneous activation of gyroscope on the one-storey building is experimentally investigated. At the different excitation frequencies, the electric motor is remotely activated to the disk speed $\Omega=4000$ rpm with the radio control system. As seen in Figure 14, the vibration is reduced from the tip displacement almost to the amplitude of base excitation within 6 seconds when the gyroscope is suddenly activated at about the maximum displacement of the one-storey building.

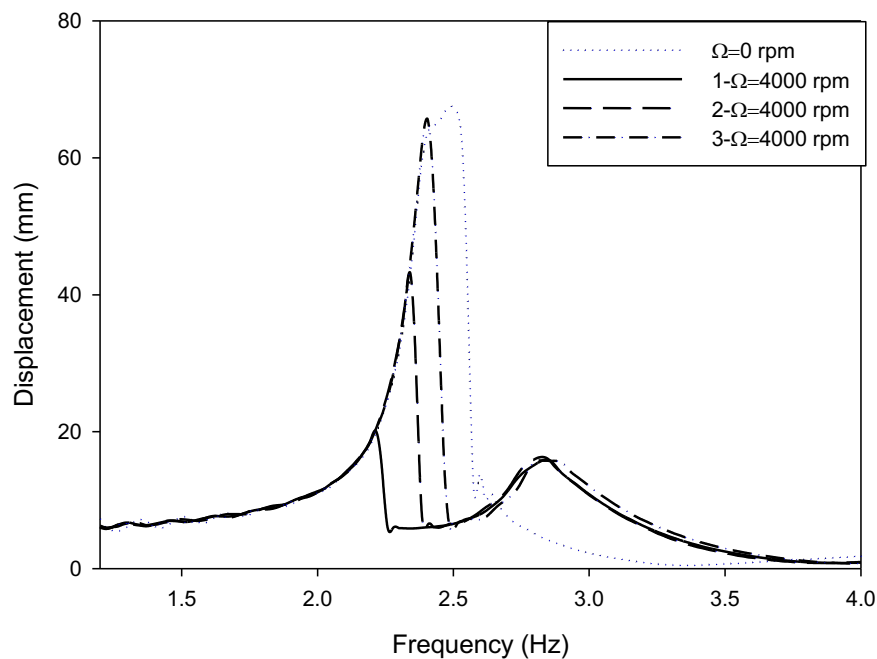


Figure 14. Experimental frequency response curves of the one-storey building for the instantaneous activation of gyroscope. No active (dotted), active after $\omega=2.20$ Hz (solid), $\omega=2.35$ Hz (dashed) and $\omega=2.44$ Hz (dash-dot). ($z_0=5$ mm, $m=0.069$ kg and $\omega_g = 1.2\omega_2$) [8]

4. Conclusion

In order to maintain the optimal damper effect of the gyroscope, the disk speed decreased with increasing disk mass. If the disk mass was 0.069 kg, the optimum disk speed was around 4000 rpm, while increasing the disk mass to 0.115 kg the optimum disk speed decreased to 3000 rpm. Since low mass and volume are preferred in dampers, the mass of the gyroscope can be decreased if the speed of disk is increased as much as possible according to the engine capacity.

The best damping in the first mode occurred at the angular momentum of the disk for $L_{\Omega} = 0.0660$ kg.m²/s. It has been observed that the best energy transfer (damping) according to this angular momentum is realized at the frequency ratio of $\omega_{gyro} / \omega_{building} = 1.2$. Control moment gyroscope has a superior advantage over conventional vibration dampers. So the gyro-column is efficient on a wide frequency range from the frequency of the gyro to the frequency of the building resonance by using an adjustable angular momentum of a gyroscope.

The initially stationary disk is accelerated suddenly at $\Omega = 4000$ rpm for angular momentum $L_{\Omega} = 0.0660$ kg.m²/s, thereby quickly minimizing the displacement of the structure in the first mode. This experiment shows that when the structure starts to oscillate as a result of an earthquake or any external factor, the vibration amplitudes of the structure can be quickly minimized by activating the disk.

An active gyro with a proportional controller can reduce the random vibration amplitude of seismic responses of a building. For subsequent research, the gimbal of the gyro can be guided by a torque control loop using a measured precession of the gimbal fed back to the control unit, which creates the counter-reactionless moment needed to stabilize the building in the upright position.

Acknowledgment

This research is supported in part by the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TÜBİTAK) via grant number 114M760.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] F. Ünker, "Tuned gyro-pendulum stabilizer for control of vibrations in structures," *Int. J. Acoust. Vib.*, vol. 25, no. 3, pp. 355–362, 2020. doi:10.20855/ijav.2020.25.31632
- [2] T. T. Soong, G. F. Dargush, *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. New York: John Wiley and Sons, 1997.
- [3] T. T. Soong and B. F. Spencer, "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice," *Eng. Struct.*, 2002, doi:10.1016/S0141-0296(01)00092-X
- [4] M. P. Singh, E. E. Matheu, and L. E. Suarez, "Active and semi-active control of structures under seismic excitation," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 1997. doi:10.1002/(SICI)1096-9845(199702)26:2<193::AID-EQE634>3.0.CO;2-#
- [5] F. Ünker and O. Çuvalcı, "Seismic Motion Control of a Column Using a Gyroscope," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 195, pp. 2316–2325, Jul. 2015. doi:10.1016/j.sbspro.2015.06.183
- [6] O. Çuvalcı, F. Ünker, T. Batuhan Baturalp, U. Gülbulak, and A. Ertaş, "Modal Control of Cantilever Beam Using a Gyrostabilizer," *Sound&Vibration*, vol. 55, no. 4, pp. 281–294, 2021. doi:10.32604/sv.2021.015705
- [7] F. Ünker and O. Çuvalcı, "Optimum Tuning of a Gyroscopic Vibration Absorber Using Coupled Gyroscopes for Vibration Control of a Vertical Cantilever Beam," *Shock Vib.*, vol. 2016, pp. 1–10, 2016. doi:10.1155/2016/1496727
- [8] F. Ünker, "Vibration control in structures with gyroscope," Karadeniz Technical University, 2018.
- [9] F. Ünker, "Proportional control moment gyroscope for two-wheeled self-balancing robot," *J. Vib. Control*, vol. 28, no 17–18, pp. 2310–2318, Sep. 2022. doi:10.1177/10775463211009988
- [10] F. Ünker, "Angular Momentum Control for Preventing Rollover of a Heavy Vehicle," *Int. J. Automot. Sci. Technol.*, pp. 135–140, Jun. 2022. doi:10.30939/ijastech..1085111

- [11] F. Ünker, "Oscillation Control of Two-Wheeled Robot using a Gyro Stabilizer," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, Jun. 2022. doi:10.29109/gujsc.1062497
- [12] M. Soleymani and M. Norouzi, "Active gyroscopic stabilizer to mitigate vibration in a multimegawatt wind turbine," *Wind Energy*, vol. 24, no. 7, pp. 720–736, Jul. 2021. doi:10.1002/we.2599
- [13] S. F. Ali and R. Padhi, "Active vibration suppression of non-linear beams using optimal dynamic inversion," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, vol. 223, no. 5, pp. 657–672, 2009. doi:10.1243/09596518JSC688
- [14] A. H. Nayfeh and P. F. Pai, *Linear and nonlinear structural mechanics*, vol. 40, no. 2. New Jersey: Wiley Interscience, 2004. doi:10.1007/s11012-005-0327-y
- [15] L. D. Zavodney and A. H. Nayfeh, "The non-linear response of a slender beam carrying a lumped mass to a principal parametric excitation: Theory and experiment," *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 24, no. 2, pp. 105–125, Jan. 1989. doi:10.1016/0020-7462(89)90003-6
- [16] E. Esmailzadeh and G. Nakhaie-Jazar, "Periodic behavior of a cantilever beam with end mass subjected to harmonic base excitation," *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 33, no. 4, pp. 567–577, Jul. 1998. doi:10.1016/S0020-7462(97)00038-3

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of the Effects of Cryogenic Process on Friction Stir Welding

Onur Özbek^a

Submitted: 16.09.2022 Revised: 11.10.2022 Accepted: 04.12.2022 doi:10.30855/gmbd.0705035

ABSTRACT

Keywords: Friction stir welding, Cryogenic treatment, Microhardness, Microstructure, Surface topography

^aDuzce University, Gumusova Vocational School, Department of Machine and Metal Technologies 81850- Duzce, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8372-3487
email: onurozbek@duzce.edu.tr

7xxx series aluminum alloys, which have high mechanical properties after the elements in their content and applied aging, have low specific gravity and high specific strength. In addition, they have excellent corrosion resistance with applied heat treatments. For these reasons, they are frequently preferred in the automotive, aviation and space industries where energy consumption is very important. However, since these alloys with low melting points are very difficult to weld, friction stir welding offers an important alternative. However, the mechanical properties of the welded points also decrease slightly in friction stir welding compared to other methods. In order to solve the problem, in this study, the parts joined by friction stir welding were cryogenically treated at -180°C deep and shallow at -80°C. Cryogenic treatment performed after friction stir welding caused significant changes in the hardness and microstructure of the weld zone. The increase in hardness observed in the junction areas of the parts, especially after deep cryogenic processing, is very important.

Kriyojenik İşlemin Sürtünme Karıştırma Kaynağı Üzerine Etkilerinin Araştırılması

ÖZ

İçeriğindeki elementler ve uygulanan yaşlandırmalar sonrası yüksek mekanik özelliklere sahip 7xxx serisi alüminyum alaşımları, düşük özgül ağırlığa ve yüksek özgül mukavemete sahiptirler. Ayrıca uygulanan ısı işlemler ile mükemmel korozyon dirençlerine sahiptirler. Bu sebeplerden ötürü enerji sarfiyatının çok önemli olduğu otomotiv, havacılık ve uzay sanayisinde sıklıkla tercih edilmektedirler. Ancak erime noktası düşük olan bu alaşımların kaynaklanması oldukça güç olduğundan sürtünme karıştırma kaynağı önemli bir alternatif sunmaktadır. Fakat kaynaklanan noktalardaki mekanik özellikler sürtünme karıştırma kaynağında da diğer yöntemlere kıyasla az da olsa düşmektedir. Sorunun çözümü için bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen parçalara -180°C’de derin ve -80°C’de sığ kriyojenik işlem uygulanmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası gerçekleştirilen kriyojenik işlem kaynak bölgesi sertliği ve mikroyapısında önemli değişikliklere neden olmuştur. Özellikle derin kriyojenik işlem sonrası parçaların birleşme bölgelerinde gözlemlenen sertlik artışı oldukça önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı, Kriyojenik bekletme, Mikro sertlik, Mikroyapı, Yüzey topografyası

1. Giriş (Introduction)

7xxx serisi alüminyum alaşımları oldukça düşük yoğunluğa sahip olmalarına rağmen yüksek mukavemet gösterebilirler. Böylece otomotiv, uzay ve havacılık sanayisinde ürünün toplam ağırlığının düşürülmesi ile hem menzili arttırıp hem de tasarrufa önemli bir katkı sağlarlar. Ayrıca bu alaşımlar mükemmel korozyon direncine de sahiptirler. Ancak alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirilmesi alüminyumun ısı ve oksijene duyarlılığı nedeniyle oldukça güçtür. 20. yüzyılın sonunda alüminyum alaşımlarının kaynatılabilmesi için sürtünme karıştırma kaynağı tekniği geliştirilmiştir [1]. Sürtünme karıştırma kaynağı ile ısı nedeniyle oluşan bu sorunlara bir miktar çözüm bulunmuştur. Bu yöntemde erime sıcaklığının altında plastik deformasyon ile kaynak yapılır [2]. Böylece yüksek ısıya maruz kalmadığı için alüminyum alaşımı erimez ve faz değişimi sınırlı kalır. Ancak kaynak bölgesinin mukavemeti sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde de diğer yöntemlere nazaran düşük olsa da ısıdan etkilenerek düşmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağında ısı sebebiyle oluşan bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda kaynak bölgesinde oluşan sıcaklığı etkileyecek girdilere odaklanılmıştır. Bunlar sürtünme karıştırma kaynağı için kullanılan omuzun ve pimin tasarımı [3], devri [4], ilerlemesi [5], batma derinliği [6], malzemesi [7], kaplaması [8] gibi pek çok girdidir. Ayrıca kaynak esnasında oluşacak ısıyı düşürebilmek adına su altında [9] ya da kriyojenik soğutma altında [10] sürtünme karıştırma kaynak çalışmaları da yapılmıştır.

Bu çalışmada ise sürtünme karıştırma kaynağı esnasında oluşan ısının neden olduğu olumsuzluklar sürtünme karıştırma kaynağı sonrasında giderilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla ısı işlem ya da talaşlı imalat gibi süreçlerden sonra malzemelerde meydana gelen hataları gidermek için kullanılan kriyojenik işlem kaynak sonrası numunelere uygulanmıştır. Kriyojenik işlem de sürtünme karıştırma kaynağı gibi yeni sayılabilecek bir araştırma konusudur. Ayrıca her iki yöntem de sürdürülebilir üretim sınıfına girmektedir. Kriyojenik işlem -50°C ve -100°C arasında sığ kriyojenik işlem (SCT), -125°C ve -196°C arasında derin kriyojenik işlem (DCT) olarak iki gruba ayrılmaktadır [11]. Kriyojenik işlemin talaşlı imalatta kesici takımların sertliğini yükselttiği [12], homojen karbür dağılımı sağladığı [13][14], böylece de takımların daha az aşındığı [15], daha uzun takım ömrü sergiledikleri [16] rapor edilmiştir. Ayrıca malzemelere uygulanan kriyojenik işlemin de malzeme sertliğini bir miktar arttırdığı [17], kalıntı gerilme [18] ve kalıntı östenit fazlarını [19][20] tamamen yada kısmen giderildiği bildirilmiştir. Alüminyum alaşımlarında da su verme işleminin neden olduğu kalıntı gerilmeleri giderebilmek için kriyojenik işleme başvuru çalışmaları literatürde mevcuttur [21]. Alüminyum alaşımına uygulanan farklı bekletme sürelerinde sığ kriyojenik işlemin ardından bazı bekletme sürelerinde yeni fazların oluştuğu rapor edilmiştir. Ancak süre uzadıkça bu fazların ortadan kalktığı bildirilmiştir. Bu fazlar ile birlikte numunenin sertleştiği, yine fazların ortadan kalktığı bekletme sürelerinde ise sertliğin düştüğü bildirilmiştir [22]. Ancak sürtünme karıştırma kaynağı sonrası kriyojenik işlem ile kaynağın mekanik özelliklerinin araştırıldığı çalışmalar birkaç tane ile sınırlıdır [23][24].

Bu çalışmada farklı ilerleme hızlarının sürtünme karıştırma kaynağı sonrası oluşan yüzey topografyasına etkilerinin yanı sıra derin ve sığ kriyojenik işlemin kaynak sertliğine ve mikroyapısına etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmanın sürtünme karıştırma kaynağı sonrası sığ ve derin kriyojenik işlemin etkilerinin belirlenmesi açısından literatüre önemli bir katkı sunacağı düşünülmektedir. Çalışma sürtünme karıştırma kaynağı alanına yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot (Material And Method)

Deney malzemesi olarak kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilen 7050-T7451 alüminyum alaşımı kullanılmıştır.

Tablo 1. Al 7050-T7451 alaşımının kimyasal bileşimi (Chemical composition of Al 7050-T7451 alloy)

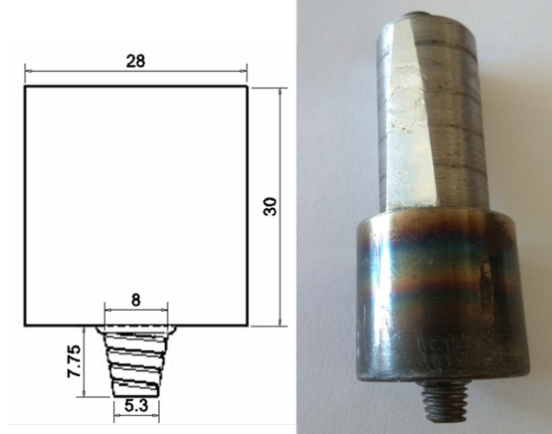
Element	Zn	Cu	Mg	Fe	Mn	Cr	Ti	Zr	Si
%	6.3	2.5	2.4	0.15	0.1	0.04	0.06	0.03	0.12

Numuneler 100x200x8 mm ölçülerine getirilmiş ve aln alına getirilerek Şekil 1’de görüldüğü gibi CNC dik işlem tezgahında tasarlanan bağlama kalıbı yardımı ile sürtünme karıştırma kaynağı yapılmıştır.



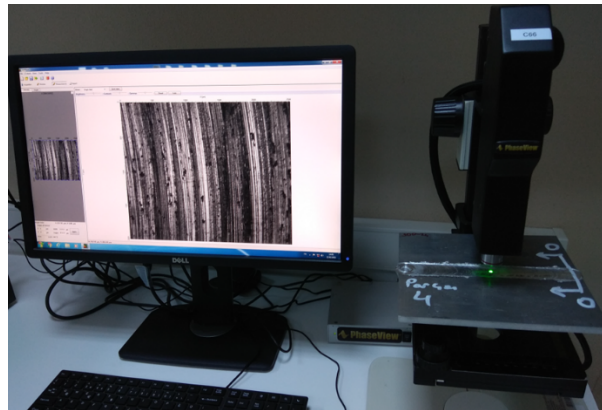
Şekil 1. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması (Friction stir welding application)

Sürtünme karıştırma kaynağı için omuz malzemesi olarak AISI 4140, pim malzemesi için ise daha mukavim olan Toolox 44 çeliği kullanılmıştır. Şekil 2’de görüldüğü gibi pim konik tornalanmıştır. Pim üzerine malzemenin doğru yöne taşınması için ters yönde diş açılmıştır. Pimin kaynağa başlayacağı noktaya öncesinde 8 mm çapında bir delik açılmıştır. Pim bu delik içerisinde 30 saniye boyunca ilerlemeksizin döndürülmüştür. Böylece pim ve omuzun kaynak malzemesine sürtmesi sonucu ortamda ısının oluşması sağlanmıştır. Kaynak esnasında pim saat yönünde döndürülerek ilerletilmiştir.



Şekil 2. Pim ile omuzun şekli ve ölçüleri (Shape and dimensions of the shoulder with the pin)

Bu çalışmada, takımın dönüşü için sabit devir (900 rpm) ve üç farklı ilerleme hızı kullanılmıştır (24, 28 ve 32 mm/dk). Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası her bir numunenin yüzey topografyası Şekil 3’de görülen Phase View marka profilometre ile ölçülmüştür. Ortalama yüzey pürüzlülük değeri Ra’nın yanı sıra Rz, Rv, Rp ve Rt değerleri ölçülmüştür.



Şekil 3. Yüzey topografyası ölçümü (Surface topography measurement)

Ardından numuneler sıvı azota temas etmeden PLC kontrollü Şekil 4'de görülen özel olarak kriyojenik işlem için tasarlanmış olan tankta kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Malzemelerin aşırı hızlı sıcaklık değişimi nedeniyle çarpılmalarını önlemek amacı ile dakikada 3°C hızla kriyojenik sıcaklığa düşülmüştür. Bu işlem -80°C'de sıg kriyojenik işlem ve -180°C'de derin kriyojenik işlem olmak üzere iki etapta gerçekleştirilmiştir. Her iki bekletme sıcaklığında da numuneler 15'er saat tutulmuştur.



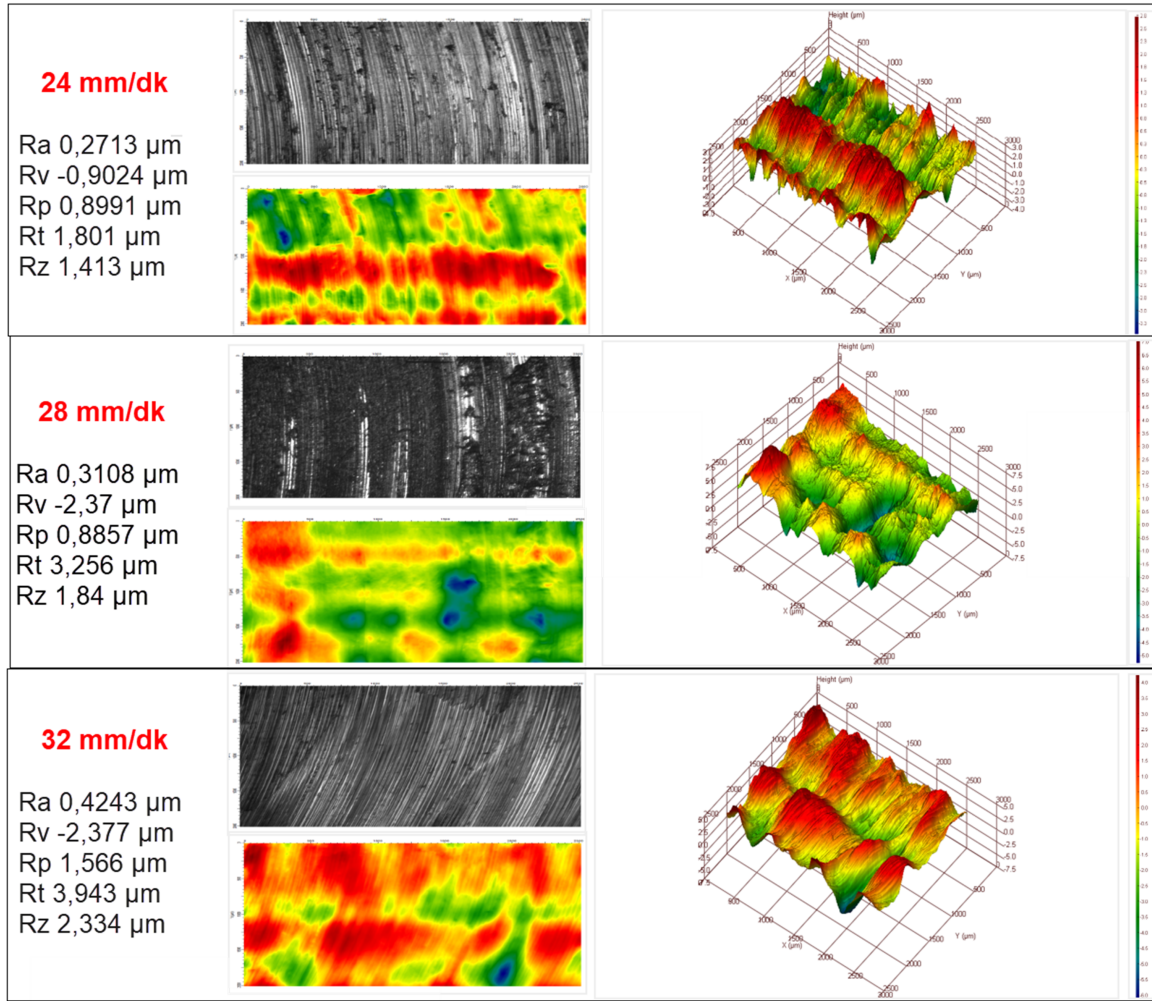
Şekil 4. PLC kontrollü kriyojenik tank (PLC controlled cryogenic tank)

Ardından numuneler yine dakikada 3°C hızla kriyojenik bekletme sıcaklığından oda sıcaklığına getirilmiştir. Kriyojenik işlemin etkisini görebilmek için mikroyapı görüntüleri alınmış ve sertlikleri ölçülmüştür. Mikroyapı için numuneler zımparalanmış ve 20 saniye süre ile Keller reaktifi ile (190 ml saf su, 5 ml HNO₃, 3 ml HCl, 2 ml HF) dağlanmıştır. Sertlik ölçme değerleri için 500 gram yük, 15 saniye süresince uygulanmıştır. Tüm numunelerin sertliği kaynak bölgesi merkez olmak üzere her iki yönde de 2'er mm ara ile ölçülmüştür.

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

3.1. Yüzey topografyası (Surface topography)

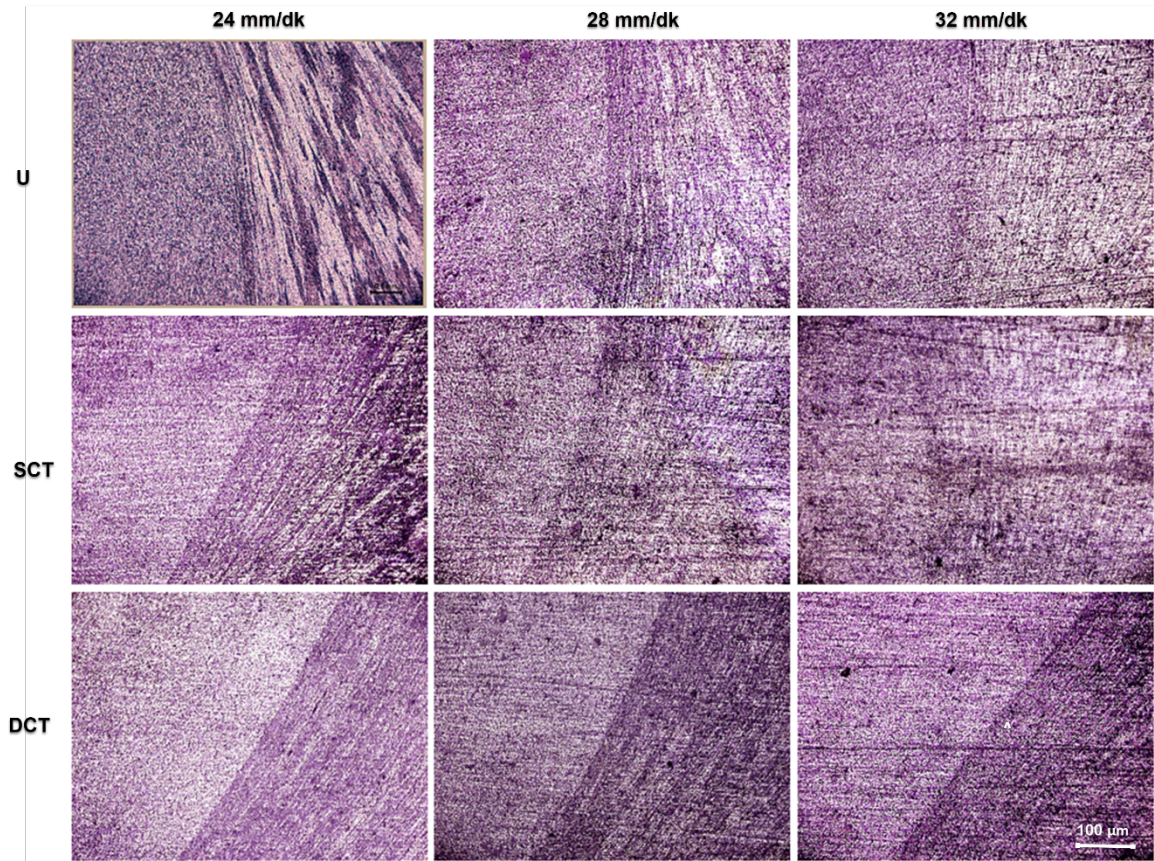
Kaynak kalitesini etkileyen önemli girdilerden olan pimin ilerleme hızının kaynak yüzeyinde oluşan yüzey kalitesini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu amaçla yüzey topoğrafyası ölçülmüş ve değerler Şekil 5'te verilmiştir. İlerleme hızının en düşük olduğu 24 mm/dk hızında Ra değeri 0,2713 µm ölçülürken 28mm/dk ilerleme hızında 0,3108 µm değerinde, en yüksek ilerleme hızında 32 mm/dk ise %56,4 oranında artarak 0,4243 µm olarak ölçülmüştür. En yüksek tepe değeri olan Rp en düşük ilerleme hızında 0,8991 µm iken, en yüksek ilerleme hızında %74,17 oranında artış göstermiş ve 1,566 µm değerine ulaşmıştır. Ölçülen yüzeydeki en derin vadinin derinliğini veren Rv değeri 24 mm/dk ilerleme hızında -0,9024 µm iken 32 mm/dk ilerleme hızında %163,41 oranında artış göstermiş ve -2,377 µm değerine ulaşmıştır. Rv ve Rp değerlerinin toplamı olan Rt değeri benzer oranlarda artış göstermiştir. En yüksek beş tepe ve vadi değerinin ortalaması olan Rz değeri ise, 24 mm/dk ilerleme hızında 1,413 µm en 32 mm/dk ilerleme hızında 2,334 µm olarak ölçülmüştür. Rz değerindeki artış oranı ise %65,18 olarak hesaplanmıştır. Yüzey topoğrafyasındaki tüm bu değerlerle bakıldığında artan ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ve topoğrafyası üzerinde büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağının mantığı sürtünme etkisi ile ortamda ısının artırılması ve malzemenin erime noktası altındaki sıcaklık değerinde bir noktadan diğer bir noktaya taşınmasıdır. Bu esnada ısıyı oluşturan takımın devri ve omuzun baskı kuvveti oldukça önemlidir. Ancak ısının dağılmasını sağlayan ve takımı bölgeden uzaklaştıran ilerleme hızıdır. Omuzun kaynak yüzeyinden dönerek ayrılırken alüminyumun yapışması ile girintili ve çıkıntılı yüzeyler oluşturması beklenmektedir. Bu ayrılmanın ısının etkisi ile daha kolay olduğu artan ilerleme hızı ile de görülmektedir.



Şekil 5. İlerleme hızına bağlı yüzey topografyasının değişimi (Change of surface topography depending on feed rate)

3.2. Mikroyapı (Microstructure)

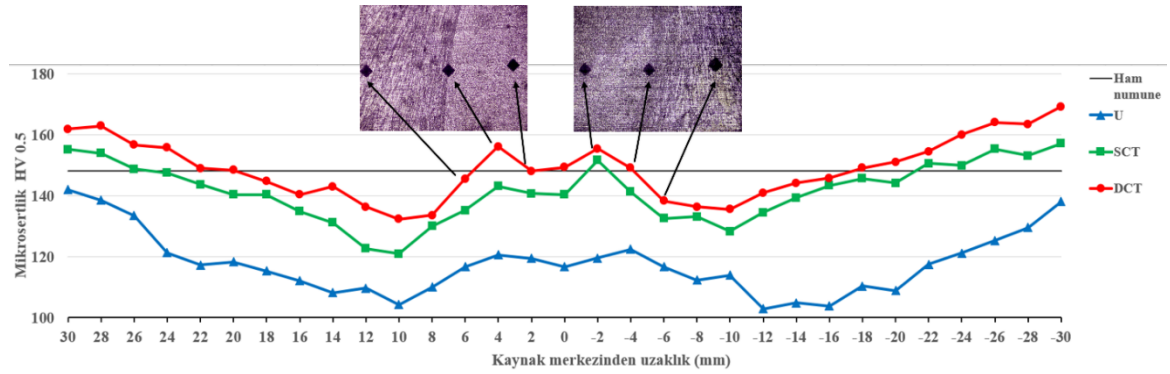
Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası pimin geçtiği dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) başta olmak üzere termomekanik olarak etkilenen bölgede (TEB) ısı etki ile yeniden kristalleşmenin görüldüğü bilinmektedir. Yeniden kristalleşen bu bölgelerde de tane yapılarının daha küçük olduğu, dislokasyonların daha az olduğu pek çok çalışmada rapor edilmiştir [8][25]. Sürtünme karıştırma kaynağında ısı etkisiyle gerçekleşen bu olaylar Şekil 6'da ilerlemenin artması ve kriyojenik işlem sonrası da gözlemlenmiştir. Kriyojenik işlemin tane yapısını küçültmesinin yanında homojen tane dağılımı, dislokasyonları ortadan kaldırma ve artık gerilmeleri düşürdüğü bilinmektedir [21]. Mikroskop ile elde edilen makro görüntülerde DKB-TEB geçişinde özellikle TEB bölgesinde tane yapıları fark edilir şekilde küçülmüştür. Tane yapılarındaki bu küçülme ilerleme hızının artması ile görülmektedir. İlerleme hızının artması pimin geçtiği bölgelerde ısının artmasına neden olmaktadır. Artan bu ısı etkisi ile tane yapıları küçülmektedir. Aynı zamanda küçülen bu taneler de kaynağın mukavemetini ve sertliğini arttırmaktadırlar[26][27].



Şekil 6. İlerleme hızı ve kriyojenik işlemin mikroyapıya etkisi (Feed rate and effect of cryogenic treatment on microstructure)

3.3. Sertlik değerlerinin deneysel sonuçları (Experimental results of hardness values)

Kriyojenik işlemin sürtünme karıştırma kaynağında sertlik üzerine etkisinin araştırılması için 900 devirde 24 mm/dk ilerleme hızında kaynaklanan numuneler kullanılmıştır. Şekil 7. incelendiğinde 148,19 Hv olan ham numune sertliğinin tüm numunelerde düştüğü görülmektedir. Özellikle kriyojenik işlem uygulanmamış işlemsiz numunede (U) sürtünme karıştırma kaynağı sonrası önemli ölçüde sertlik düşüşü gözlemlenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası alüminyumun sertliğinin, mekanik ve termal faktörlerden olumsuz etkilenmesi beklenen bir durumdur. DKB baz alındığında en yüksek sertlik değerinin derin kriyojenik işlem ile sağlandığı görülmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası artan sıcaklık etkisi ile yeniden kristallenen bu bölgede tane yapısının küçülmesi ile sertliğin arttığı bilinmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağının sergilediği bu özellik kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde de görülmektedir. Kriyojenik işlem sonucu malzemede yeniden kristallenme gerçekleştiği ve tane yapısının küçüldüğünü bildiren pek çok çalışma mevcuttur. Yani sürtünme karıştırma kaynağı sonrası uygulanan kriyojenik işlem ile ikinci kez ısı etkisi ile tane yapısı küçülmüştür. Kriyojenik işlemin tane yapısını küçültmesinin yanında homojen tane dağılımı, dislokasyonları ortadan kaldırma ve artık gerilmeleri düşürdüğü bilinmektedir. Böylece DKB'de sertliğin kriyojenik işlem ile arttığı düşünülmektedir. Derin kriyojenik işlemin de sığ kriyojenik işleme göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Sığ kriyojenik işlem uygulanmış numune sertliği, DKB'de işlemsiz numuneye göre artmıştır. Ancak ham numune sertliğine ulaşamamıştır. DKB'de ve tüm bölgelerde en yüksek sertlik değerlerine sahip olan numune derin kriyojenik işlem uygulanan numune olmuştur. Derin kriyojenik işlem uygulanan numune DKB'de ham numune sertlik değeri üzerine de çıkmıştır.



Şekil 7. Kriyojenik işlemin sürtünme karıştırma kaynağı sertliğine etkisi (Effect of cryogenic treatment on friction stir welding hardness)

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada Al 7050-T7451 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında üç farklı ilerleme hızı kullanılmış ve ilerleme hızının yüzey topografyasına etkileri araştırılmıştır. Ayrıca farklı sıcaklıklarda uygulanan kriyojenik işlemin kaynak bölgelerinde neden olduğu mikroyapı ve sertlik değişimleri incelenmiştir. Deneyler sonrası elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ilerleme hızının 24 mm/dk hızından 32 mm/dk hızına artırılması ile yüzey pürüzlülük değerleri Ra %56,4, Rz %65,18, Rp %74,17 ve Rv %163,41 oranında artmıştır.
- İlerleme hızının artması ile hem DKB hem de TEB'de tane yapısının küçüldüğü gözlemlenmiştir.
- Kriyojenik işlem uygulanmış kaynaklarda DKB ve TEB'de tane yapısı küçülmüştür.
- Kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde sertliğin işlemsiz numunelere göre artış gösterdiği tespit edilmiştir.
- Derin kriyojenik işlemin sığ kriyojenik işleme göre kaynak bölgesi sertliğini daha fazla etkilediği gözlemlenmiştir.
- Derin kriyojenik işlem uygulanan numunede sertlik değerinin DKB'de ham numuneye göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] Z. Y. Ma, A. H. Feng, D. L. Chen, and J. Shen, 'Recent advances in friction stir welding/processing of aluminum alloys: microstructural evolution and mechanical properties', *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 43, no. 4, pp. 269-333, 2018. doi:10.1080/10408436.2017.1358145
- [2] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, 'Friction stir welding and processing', *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-78, 2005. doi:10.1016/j.mser.2005.07.001
- [3] Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, and P. Wanjara, 'Review of tools for friction stir welding and processing', *Can. J. Metall. Mater. Sci.*, vol. 51, no. 3, pp. 250-261, Jul. 2013. doi:10.1179/1879139512Y.0000000015
- [4] B. Çevik, B. Özçatalbaş, Y. Gülenç, 'Skk ile birleştirilen 7075-T651 Al alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine devir sayısının etkisi', in *3rd International Conference on Welding Technologies and Exhibition, 21-23 May 2014, Manisa Türkiye*, pp. 658-668.
- [5] A. Kurt, M. Boz, and M. Özdemir, 'Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi', *Fak. Der. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Cilt*, vol. 19, no. 2, pp. 191-197, 2004.
- [6] G. İpekoğlu, Ö. Akçam, and G. Çam, 'Farklı Kalınlıktaki AA6061-T6 Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı için Uygun Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi', *AKU J. Sci. Eng.*, vol. 18, pp. 324-335, 2018. doi:10.5578/fmbd.66765
- [7] V. P. Singh, S. K. Patel, A. Ranjan, and B. Kuriachen, 'Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium-magnesium alloys: A critical review', *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 6217-6256, 2020. doi:10.1016/j.jmrt.2020.01.008
- [8] Ç. Bekir, 'Sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin kalıntı gerilmelere ve birleştirmenin mekanik özelliklerine etkisi',

Ph.D. dissertation, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.

[9] M. A. Wahid, Z. A. Khan, and A. N. Siddiquee, 'Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties', *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 28, no. 2, pp. 193–219, Feb. 2018. doi:10.1016/S1003-6326(18)64653-9

[10] C. Sharma, D. K. Dwivedi, and P. Kumar, 'Influence of in-process cooling on tensile behaviour of friction stir welded joints of AA7039', *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 556, pp. 479–487, Oct. 2012. doi:10.1016/J.MSEA.2012.07.016

[11] N. Altan Özbek, 'The investigation of the effects of cryogenic treatment applied to cutting tools on tool life in machining AISI 316 austenitic stainless steel', Ph.D. dissertation, Gazi University, Ankara, Türkiye, 2013.

[12] N. A. Özbek, 'Effects of cryogenic treatment types on the performance of coated tungsten tools in the turning of AISI H11 steel', *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 9442–9456, 2020. doi:10.1016/j.jmrt.2020.03.038

[13] N. A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, and O. Özbek, 'Application of deep cryogenic treatment to uncoated tungsten carbide inserts in the turning of AISI 304 stainless steel', *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 47, no. 12, pp. 6270–6280, Dec. 2016. doi:10.1007/s11661-016-3767-1

[14] N. A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, and O. Özbek, 'Effect of cutting conditions on wear performance of cryogenically treated tungsten carbide inserts in dry turning of stainless steel', *Tribol. Int.*, vol. 94, pp. 223–233, 2016, doi:10.1016/j.triboint.2015.08.024.

[15] E. Demir, 'Investigation of the effects of holding times at cryogenic temperatures on residual stress distribution of AISI D2 tool steel', M.Sc. dissertation, Yildirim Beyazit University, Ankara, Türkiye, 2014.

[16] N. A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, and O. Özbek, 'Investigation of the effects of cryogenic treatment applied at different holding times to cemented carbide inserts on tool wear', *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 86, 2014. doi:10.1016/j.ijmactools.2014.06.007

[17] O. Özbek, 'Kriyojenik işlem sonrası temperleme sıcaklığı, bekletme süresi ve soğutma ortamının Al 7050-T7451 alaşımının sertliğine etkilerinin araştırılması', in *International Marmara Sciences Congress, 10-11 Dec 2021, Kocaeli Türkiye*, pp. 369–375, 2021, no. Dec, pp. 369–375.

[18] E. El, F. Kara, and O. Özbek, 'Researching the effect of shallow cryogenic treatment on the metallurgical features of sleipner cold work tool steel', *Gazi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 7, no. 2, pp. 111–120, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.02.04

[19] F. Kara, O. Özbek, N. Altan Özbek, and İ. Uygur, 'Investigation of the effect of deep cryogenic process on residual stress and residual austenite', *Gazi J. Eng. Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 3–11, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.02.07

[20] F. Kara, 'AISI 52100 çeliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması', Karabük Üniversitesi, Ph.D. dissertation, Karabük, Türkiye, 2014.

[21] M. Araghchi, H. Mansouri, R. Vafaei, and Y. Guo, 'A novel cryogenic treatment for reduction of residual stresses in 2024 aluminum alloy', *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 689, no. January, pp. 48–52, 2017. doi:10.1016/j.msea.2017.01.095

[22] M. K. Chaanthini, M. Govindaraju, and S. Arul, 'Effect of cryogenic treatment on mechanical properties of aluminium alloy AA2014', *J. Inst. Eng. Ser. D*, vol. 101, no. 2, pp. 265–270, 2020. doi:10.1007/s40033-020-00237-y

[23] V. Neelamegam, B. Govindasamy Bhavani, M. Muthukrishnan, and S. R. Tadvika, 'Investigation on corrosion behavior of cryogenically treated friction stir welded aa5083', *Mechanika*, vol. 26, no. 5, pp. 442–449, 2020. doi:10.5755/j01.mech.26.5.23571

[24] A. Bansal *et al.*, 'Influence of cryogenic treatment on mechanical performance of friction stir Al-Zn-Cu alloy weldments', *J. Manuf. Process.*, vol. 56, no. March, pp. 43–53, 2020. doi:10.1016/j.jmapro.2020.04.067

[25] F. Sarsılmaz, 'Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması', Fırat Üniversitesi, Ph.D. dissertation, Elazığ, Türkiye, 2009.

[26] Y. Morisada, T. Imaizumi, and H. Fujii, 'Determination of strain rate in friction stir welding by three-dimensional visualization of material flow using X-ray radiography', *Scr. Mater.*, vol. 106, pp. 57–60, Sep. 2015. doi:10.1016/J.SCRIPTAMAT.2015.05.006

[27] B. Çevik, B. Özçatalbaş, Y. Gülenç, 'Effect of welding speed on the mechanical properties and weld defects of 7075 Al alloy joined by FSW', *Kov. Mater.*, vol. 56, 2016. doi:10.4149/km_2016_3_241

This is an open access article under the CC-BY license



GAZI

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of Physical and Mechanical Properties of Concrete Produced with Scraped Asphalt Waste and Glass Fiber

Turhan Can Karci^a, Behcet Dünder^{*b}, Emriye Cınar Resuloğulları^c

Submitted: 13.10.2022 Revised: 09.11.2022 Accepted: 29.12.2022 doi:10.30855/gmbd.0705036

ABSTRACT

Keywords: Scraped Asphalt Waste, Glass Fiber, Abrasion, Fiber Concrete

^a Osmaniye Korkut Ata University,
Engineering Faculty,
Dept. of Civil Engineering
8000 - Osmaniye, Türkiye
Orcid: 0000-0002-2993-0178

^{b,*} Osmaniye Korkut Ata University,
Engineering Faculty,
Dept. of Civil Engineering
8000 - Osmaniye, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0724-9469
e mail: behcetdunder@osmaniye.edu.tr

^c Osmaniye Korkut Ata University,
Engineering Faculty,
Dept. of Civil Engineering
8000 - Osmaniye, Türkiye
Orcid: 0000-0002-9435-2968

*Corresponding author:
behcetdunder@osmaniye.edu.tr

Since aggregates constitute the majority of the concrete volume, the use of waste aggregates is preferred to reduce natural aggregate consumption, contribute to waste disposal and reduce costs. The most important property expected from concrete is compressive strength. However, in this study, Recycle Asphalt Pavement (RAP) and Glass Fiber (GF) were used to improve the tensile strength of concrete as well as compressive strength. For the experimental study, RAP was replaced with 0-4 mm crushed sand at 0% (REF), 30%, 60% and 90% by weight, and GF with 6 mm length was included in the mixture in the amount of 0.5, 1 and 1.5 kg/m³ by weight has been done. CEM I 42.5 R type cement was used as binder, and crushed sand (0-4 mm) and crushed stone (4-12 mm) aggregate were used as aggregate. The water/cement ratio was waited constant at 0.4. Concrete samples were produced in dimensions of 15x15x15, 10x10x10 and 7.1x7.1x7.1 cm. After the samples produced were waited in the standard curing pool for 7 and 28 days, the experiments were carried out. In the scope of the study, Slump test, compressive strength, splitting tensile strength, unit volume weight, water absorption, porosity and Böhme (abrasion) experiments were performed on the samples. As a result of the experiments, the highest compressive strength was measured in the REF sample and the lowest strength was measured in the KAA90-CE1.5 sample in 28-day samples. As a result of the study, the ideal WAA replacement rate was determined as 30% and the most ideal CE usage amount was determined as 1.0 kg/m³.

Kazınmış Asfalt Atığı ve Cam Elyaf ile Üretilen Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

ÖZ

Beton hacminin büyük bir çoğunluğunu agregalar oluşturduğundan atık agregaların kullanımı, doğal agrega tüketimini azaltmak, atık bertarafına katkı sağlamak ve maliyeti düşürmek için tercih edilmektedir. Betondan beklenen en önemli özellik basınç dayanımıdır. Ancak bu çalışmada basınç dayanımının yanında betonların çekme dayanımlarını iyileştirmek amacıyla Kazınmış Asfalt Atığı (KAA) ile Cam Elyaf (CE) kullanılmıştır. Deneysel çalışma için KAA ağırlıkça %0 (REF), %30, %60 ve %90 oranlarında 0-4 mm boyutlarında kırma kum ile ikame edilerek, 6 mm uzunluğuna sahip olan CE ise ağırlıkça 0.5, 1 ve 1.5 kg/m³ miktarda karışıma dahil edilmiştir. Bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R tipi çimento, agregalar olarak da kırma kum (0-4 mm) ve kırma taş (4-12 mm) agregası kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0.4 olarak sabit tutulmuştur. Beton numuneleri 15x15x15, 10x10x10 ve 7.1x7.1x7.1 cm boyutlarında üretilmiştir. Üretilen numuneler 7 ve 28 gün süreyle standart kür havuzunda bekletildikten sonra deneyler uygulanmıştır. Çalışmada kapsamında numunelere Slump (çökme), basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, birim hacim ağırlık, su emme, porozite ve Böhme (aşınma) deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, 28 günlük numunelerde en yüksek basınç dayanımı REF numunesinde, en düşük dayanım ise KAA90-CE1.5 numunesinde ölçülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda en ideal KAA'nın ikame oranı %30, en ideal CE kullanım miktarı ise 1.0 kg/m³ olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kazınmış Asfalt Atığı, Cam Elyaf, Aşınma, Lifli Beton

1. Giriş (Introduction)

Dünyada her yıl farklı ve çok sayıda endüstriyel atık oluşmaktadır. Bu atıklara uçucu kül, yüksek fırın cürufu, beton atıkları ve asfalt kaplama atıkları örnek olarak gösterilebilir. Bu atıkların beraberinde getirdiği sorunlardan olan depolama sorunu giderek artmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için atık malzemelerin geri dönüşüm sürecine sokulması gerekmektedir. Aynı zamanda atık malzemeleri geri dönüştürülmesi çevre kirliliği azaltma yöntemleri arasında yer alır. Bu atıklardan biri olan asfalt atığı, üst yapı onarım sürecine bağlı olarak ortaya çıkan bitümlü bir malzemedir. Asfalt atığı eskimiş asfalt ve agregadan meydana gelir ve alt tabanında granüler bir malzeme içerir. Asfalt atığı agregasını çimento esaslı malzemelere dâhil edilmesi çevresel ve ekonomik faydalar sağlamaktadır [1]. Bunun üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde işlenebilirliği ve mekanik davranışlarda olumsuz, süneklik davranışlarında iyileşme gösterdiği bildirilmiştir [2,3]. Beton üretiminde kullanılan agregaların azaltılıp geri dönüştürülmüş malzeme ile yer değiştirilmesi çevre kirliliği ve depolama sorunlarını da düzenli olarak azaltmaktadır [4]. Bu nedenle betonda kullanılan geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı gün geçtikçe daha çok artmaktadır. Betonlarda geri dönüştürülmüş atıkların kullanımının yanısıra mekanik davranışlarını arttırmak için mineral katkılar ve çeşitli lifler eklenerek zayıf olan özellikleri güçlendirilmektedir. Beton çekme dayanımı açısından zayıf bir malzemedir. Zamanla uygulanan gerilmeler nedeniyle betonda çatlamlar ve dayanıklılık sorunlarından kaynaklanan bozulmalar görülmektedir [5,6]. Beton elemanlarının çekme dayanımını iyileştirmek için karışımda çeşitli lifler kullanılmaktadır. Aynı zamanda lif ilavesi çatlak direncinin artırılmasında etkili bir yöntemdir [7-9]. Bu durum çekme yükleri altındaki betonun kapasitesini önemli ölçüde arttırmaktadır. Liflerin uçak park yerleri, tünel kaplamaları, şev stabilizasyonları, hidrolik yapılar ve patlamaya dayanıklı yapılarda kullanımı gün geçtikçe artmaktadır [10,11]. Genel olarak çatlak direnci için kullanılan CE'ler, çekme mukavemetini arttırması nedeniyle yaygın olarak kullanılır. Kullanılan CE, liflerin genel özellikleri olan işlenebilirlik açısından olumsuz etkilere sahip olsa da betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir [12]. Literatürde KAA ve CE kullanımlarıyla ilgili literatür mevcuttur. Soltanabadi, vd. yapmış oldukları çalışmada doğal iri agrega, geri dönüştürülmüş beton agregası ve geri dönüştürülmüş asfalt agregası içeren karışımların davranışını incelemiştir. Geri dönüştürülmüş asfalt atığını %50 ve %100 oranlarında kullanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde ise doğal iri agreganın %50 oranında asfalt ve beton atığı ile değiştirilmesinde kesme kapasitesinde %4 ile %11 oranları arasında azalma gözlemlenmiştir [13]. Muhammed et al. (2021), CE içeren yüksek performanslı fiber takviyeli harçların süneklik özelliklerini ve fiziksel özelliklerini araştırmışlardır. Numune üretiminde CE'yi hacimsel olarak %3, %2.5, %2, %1.5, %1, %0.5 ve %0 oranlarında kullanmışlardır. Sonuçlar, %3 ila %1.5 CE içeren karışımın daha yüksek mukavemet gösterdiğini ve daha fazla CE ilavesinin faydasız olduğunu gözlemlenmiştir [14]. Paktiawal ve Alam 2022 yılında yapmış oldukları çalışmada CE ve Bazalt elyaf kullanarak yüksek dayanımlı betonlar üretmişlerdir. Kullanılan elyaf oranlarını çimentoya ağırlıkça %0.8, 1.2, 1.6, 2.0 ve %2.4 olarak seçmişlerdir. Sonuç olarak optimum CE ve bazalt elyaf oranlarının sırasıyla %1.6 ve %1.2 olarak ve CE'nin bazalt elyaftan daha yüksek oranda dağılma özelliği gösterdiğini saptamışlardır [15].

Bu çalışmada, KAA ve CE ile üretilen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. KAA güncel çalışmalarda sıklıkla kullanılan bir atık türüdür. Ancak bu çalışmada KAA kullanımının yanında CE kullanılarak iki değişkenin birlikte kullanıldığı ve ayrıntılı bir şekilde beton özelliklerine etkisinin incelendiği çalışmaya rastlanmamıştır. KAA ile beton üretiminde, bazı olumsuz mekanik özelliklerini iyileştirilmesi amacıyla CE ile birlikte bu olumsuzlukların giderilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda s/ç oranı 0.4 ve çimento dozajı 350 kg olarak sabit tutulmuştur. KAA %0, %30, %60 ve %90 oranlarında 0-4 mm boyutlarında olan kırma kum ile ikame edilmiştir. CE ise ağırlıkça 0.5, 1.0 ve 1.5 kg/m³ miktarlarında kullanılmıştır. Üretilen betonlara Slump (çökme) deneyi, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, birim hacim ağırlık, su emme, porozite ve Böhme (aşınma) deneyleri uygulanmıştır.

2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

Deneysel çalışma için kullanılacak olan betonun hazırlanmasında bağlayıcı olarak TS EN 197-1 standardına uygun olarak üretilen ÇİMSA Çimento San. Tic. A.Ş.'den temin edilen CEM I-42.5/R tipi çimento kullanılmıştır [16]. Bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan CEM I 42.5/R çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri (Chemical and physical properties of the CEM I 42.5/R cement used)

	Kimyasal Analiz	Analiz Sonuçları (%)
Kimyasal Özellikler	Al ₂ O ₃ (%)	5.65
	SiO ₂ (%)	20.62
	CaO (%)	62.08
	Fe ₂ O ₃ (%)	4.05
	K ₂ O (%)	0.69
	SO ₃ (%)	2.57
	MgO (%)	2.55
	Na ₂ O (%)	0.27
	Kızdırma Kaybı	1.55
	Çözünmez Kalıntı	0.54
Fiziksel Özellikler	Yoğunluk (gr/cm ³)	3.11
	Blaine- İncelik (cm ² /g)	3400
	Serbest CaO	0.3
	Serbest Kireç	1.21
	Priz Başlangıcı (dk)	135
	Priz Sonu (dk)	220

Beton numuneler üretiminde kullanılan su, TS EN 1008 standardına göre içilebilir nitelikte Osmaniye ili şebeke suyu kullanılmıştır [17]. Agregalar olarak TS 706 EN12620+A1 standardına uygun kırma kum (0-4 mm) ve kırma taş (4-12 mm) agregaları kullanılmıştır [18]. Beton numunelerin hazırlanırken karışımda kullanılan kimyasal katkı yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı (Fosroc Gantre 142) seçilmiştir. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı her karışım için sabit tutulup bağlayıcının %1.2 oranında karışıma ilave edilmiştir. Kullanılan kimyasal katkının teknik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kimyasal katkının teknik özellikleri (Technical characteristics of the chemical additive)

Özellikler	Değerler
Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Görünüm	Kahverengi- Sıvı
Özgül Ağırlık	25 °C'de 1.18 kg/L
pH Değeri	5-7
Klor İçeriği	En fazla %0.1
Hava Sürüklenmesi	En fazla %2

Osmaniye Belediyesinden temin edilen KAA, kullanım ömrünü tamamlamış veya yenilenmek için kazınan asfalt çeneli kırıcı yardımıyla kırılarak 0-4 mm tane boyutuna getirilip numune üretiminde kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. KAA görünümü (KAA appearance)

Çalışmada kullanılan CE, Fiber Elyaf Kompozit A.Ş. tarafından üretilen 6 mm uzunluğunda seçilmiştir. Kullanılan CE'ye ait teknik özellikler Tablo 3'te, görünümü ise Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 3. CE'in teknik özellikleri (Technical specifications of CE)

Lif Çeşidi	Lif Boyu (mm)	Lif Çapı (μm)	Özgül Ağırlık (mg/m^3)	Elastisite Modülü (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
Cam	6	13	2.68	72000	1700



Şekil 2. CE görünümü (CE appearance)

Çalışma kapsamında hazırlanan beton numuneler TS 802 standardına uygun olarak beton karışımları hazırlanmıştır [19]. KAA, 0-4 mm kırma kum ile %0, %30, %60 ve %90 oranlarında ikame edilmiştir. CE ise ağırlıkça 0.5, 1.0 ve 1.5 kg/m^3 miktarlarında kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen beton numunelerinin KAA ve CE içeriğine göre isimlendirilmiştir. Örneğin KAA30-CE1.5 isimlendirilmesinde KAA30 ifadesi KAA oranının %30 olduğunu, CE1.5 ifadesi ise CE'nin 1.5 kg/m^3 miktarında kullanıldığını ifade etmektedir. Üretilen numunelerin hazırlanmasında kullanılan 1 m^3 için malzeme miktarları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. 1 m3 Beton için gerekli olan malzeme miktarları (kg) (Amount of material required for 1 m3 of concrete (kg))

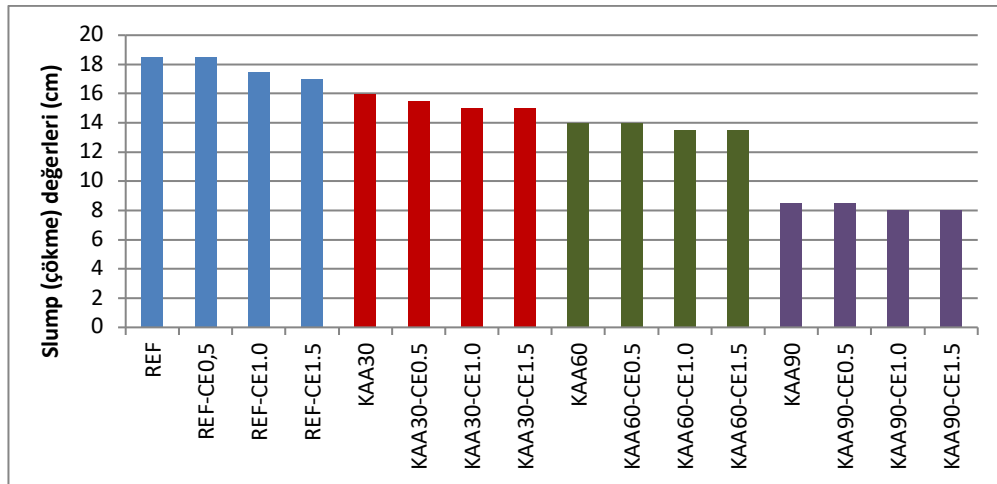
Numune Adı	Çimento	Su	CE	Kimyasal Katkı	Kırma Kum (0-4 mm)	Kırma Taş (4-12 mm)	KAA
REF			0		1073		0
REF-CE0.5			0.5		1073		0
REF-CE1.0			1		1073		0
REF-CE1.5			1.5		1073		0
KAA30			0		749		276
KAA30-CE0.5			0.5		749		276
KAA30-CE1.0			1		749		276
KAA30-CE1.5			1.5		749		276
KAA60	350	140	0	4.2	425	875	552
KAA60-CE0.5			0.5		425		552
KAA60-CE1.0			1		425		552
KAA60-CE1.5			1.5		425		552
KAA90			0		101		827
KAA90-CE0.5			0.5		101		827
KAA90-CE1.0			1		101		827
KAA90-CE1.5			1.5		101		827

Taze haldeki betonların işlenebilirliğinin belirlenmesi amacıyla TS EN 12350-2 standardına uygun olarak Slump (çökme) deneyi yapılmıştır [20]. Slump deneyi yapılan numuneler önceden yağlanmış 15x15x15, 10x10x10 ve 7.1x7.1x7.1 cm boyutlarındaki kalıplara sarsma tablası yardımıyla yerleştirilmiştir. 24 saat kalıpta bekletildikten sonra sertleşen beton numuneleri kür havuzuna alınmıştır. Boyutları 15x15x15 cm olan beton numuneleri 7 ve 28 günlük kür sürelerinin tamamlanmasından ardından TS EN 12390-3 standardına uygun basınç dayanımı, TS EN 12390-6 standardına uygun yarmada çekme dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur [21,22]. Boyutları 10x10x10 cm olan beton numuneleri üzerinde Arşimet terazisi yardımıyla TS EN 1170-6 standardına uygun olarak porozite, su emme ve BHA'ları belirlenmiştir [23].

Boyutları 7.1x7.1x7.1 cm olan beton numunelerinin aşınma dirençlerinin belirlenmesi amacıyla TS 2824 EN 1338/AC standardına uygun Böhme (aşınma) deneyine tabi tutulmuştur [24]. Böhme (aşınma) deneyi sırasında, numune döküm yüzeyi ve ona karşılık gelen alt yüzey hariç diğer 4 yüzeyin 4 kez yapılması sonucu toplamda 16 defa tekrarlanarak numune aşınmaya maruz bırakılmıştır. Her bir aşınma sırasında 20 gramlık zımpara tozu kullanılmış olup yatay disk 22 tur çevrilerek numuneler aşınmaya maruz bırakılmıştır. Deney sonrasında numunenin aşınma sonucu ağırlık kayıpları belirlenmiştir.

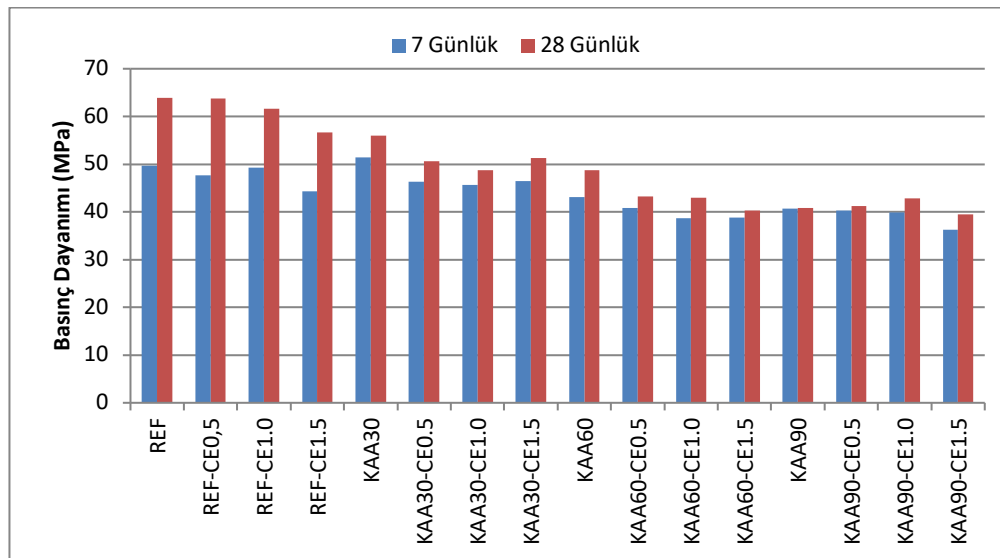
3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Hazırlanan beton karışımlarının işlenebilirliğini belirlemek için taze haldeki betona Slump (çökme) deneyi yapılmıştır. Yapılan Slump (çökme) deneyinin sonuçları Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde REF numunesinin çökme değeri 18.5 cm ölçülmüştür. REF karışımlarına CE eklendikçe Slump (çökme) değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. REF-0.5, REF-1 ve REF-1.5 numunelerin Slump (çökme) değerleri sırasıyla 18.5, 17.5 ve 17 cm belirlenmiştir. KAA30, KAA60 ve KAA90 numunelerinde benzer sonuçlar görülmüş ve CE miktarı arttıkça Slump (çökme) değeri azalmıştır. Amin M. vd 2020 yılında yapmış olduğu çalışmada CE miktarının artmasıyla Slump (çökme) değerinin azalmasını gözlemlemiştir [25]. Slump (çökme) değerlerini KAA açısından incelendiğinde KAA ikame oranı arttıkça çökme değerleri azalmıştır. Hossiney N. Vd 2020 yılında yapmış oldukları çalışmada asfalt atığı içermeyen numunede en yüksek Slump (çökme) değeri görülürken %25, %50 ve %75 asfalt atığı içeren numunelerde Slump (çökme) değerlerinde azalmalar olmuştur [26]. En düşük çökme değeri ise 8 cm ile KAA90-CE1.5, en yüksek çökme değeri ise 18.5 cm ile REF numunesine aittir.



Şekil 3. Slump (çökme) değerleri sonuçları (Slump values results)

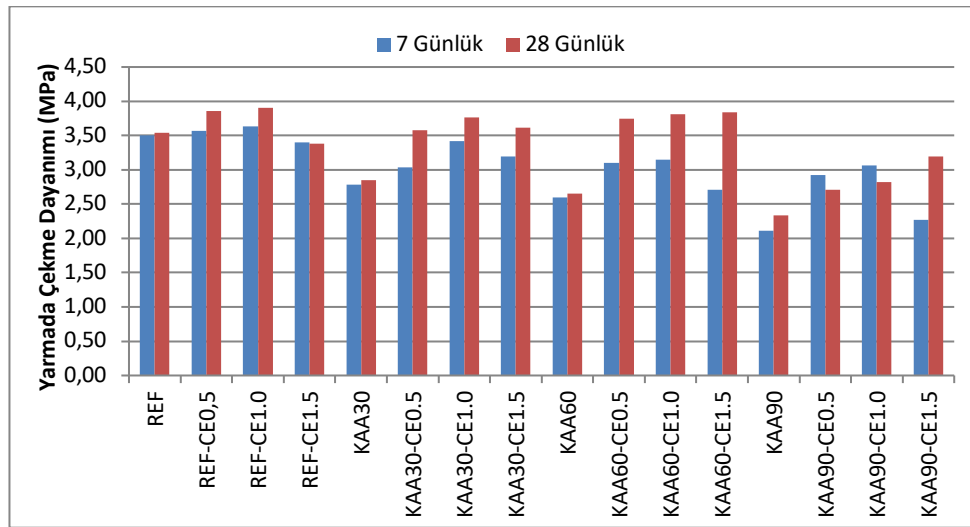
Üretilen beton numunelerine 7 ve 28 günlük kür uygulamasının ardından basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. KAA ve CE'li numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları Şekil 4'te verilmiştir. Beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanım verileri incelendiğinde en yüksek dayanım 51.45 MPa değeri ile KAA30 olmuştur. En düşük dayanım ise 36.32 MPa değeri ile KAA90-CE1.5 numunesinde meydana gelmiştir. Beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanım verileri incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı 63.84 MPa değeri ile REF numunesinde, en düşük dayanım ise 39.44 MPa değeri ile KAA90-CE1.5 olmuştur. Beton kür süresi arttıkça tüm numunelerin basınç dayanımlarında artış gerçekleşmiştir. REF ve KAA numunelerinde CE miktarı arttıkça basınç dayanımlarında genel olarak bir düşüş gerçekleştiği görülmektedir. KAA ikame oranının %30 olduğu KAA30 numunesinde basınç dayanımı REF numunesine oranla artarken, bu oranın %60 ve %90 çıkması durumunda basınç dayanımı düşüşleri gerçekleşmiştir. Basınç dayanımı için en ideal oranın KAA30 olduğu görülmüştür. Beton numunelerde basınç dayanımının azalmasına neden olan agrega ile yer değiştirilen KAA'nın beton içerisinde bitümden kaynaklı yumuşak yüzey oluşturması olduğu söylenebilir [27].



Şekil 4. Beton numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları (7 and 28 day compressive strength results of concrete Samples)

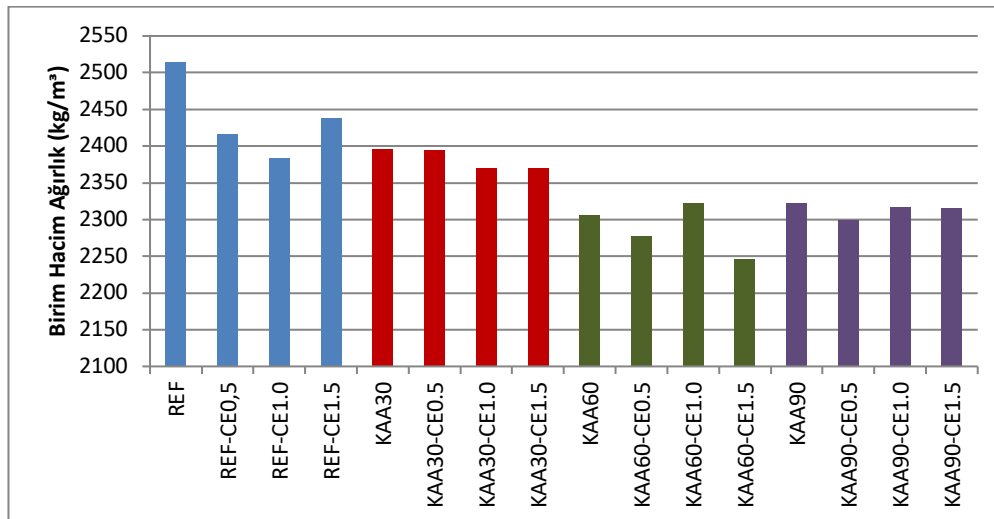
Üretilen beton numunelerine 7 ve 28 günlük kür uygulamasının ardından yarmada çekme dayanımı deneyi uygulanmıştır. KAA ve CE'li numunelerin 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımları Şekil 5'te verilmiştir. 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımı verileri incelendiğinde, CE 1.0 kg/m³ miktarında kullanıldığında yarmada çekme dayanımı artarken CE miktarının 1.5 kg/m³ kullanımıyla düşüşler gerçekleşmiştir. Genel olarak KAA ikame oranının artmasıyla birlikte yarmada çekme dayanımlarında düşüşler gerçekleşmiştir. 7 günlük yarmada çekme dayanımında en yüksek dayanım 3.633 MPa değeri

ile REF-CE1 numunesi, en düşük çekme dayanımı ise 2.110 MPa değeri ile KAA90 numunesinde olmuştur. 28 günlük yarmada çekme dayanım verileri incelendiğinde en yüksek çekme dayanımı 3.906 MPa değeri ile REF-CE1 numunesi, en düşük dayanım ise 2.334 MPa değeri ile KAA90 numunesinde olmuştur. KAA içeren numuneler incelendiğinde ise REF-CE1.0 numunesine en yakın 3.842 MPa değeri ile KAA60-CE1.5 numunesi olmuştur. Beton numunelerinin yarmada çekme dayanımları esas alındığında en ideal CE miktarının 1.0 kg/m³ olduğu sonucuna varılmıştır. Marcalikova, vd. 2020 yılında yapmış oldukları çalışmada farklı elyaf türlerinin çekme mukavemetini karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise lifli betonların normal betonlara göre basınç dayanımlarında düşüş görülürken, çekme mukavemetinde önemli bir artış görmüştür [28]. Yurt 2020 yılında yapmış olduğu çalışmada CE, bazalt elyaf ve polipropilen elyaf olmak üzere farklı çeşit elyafları Jeopolimer betonda kullanmış ve eğilme dayanımlarının arttığını gözlemlemiştir [29]. Ahmed, vd. 2017 yılında normal beton ve CE takviyeli kendiliğinden yerleşen beton ile yapmış olduğu çalışmada CE ilavesinin yarmada çekme dayanımını arttırdığını göstermiştir [30].



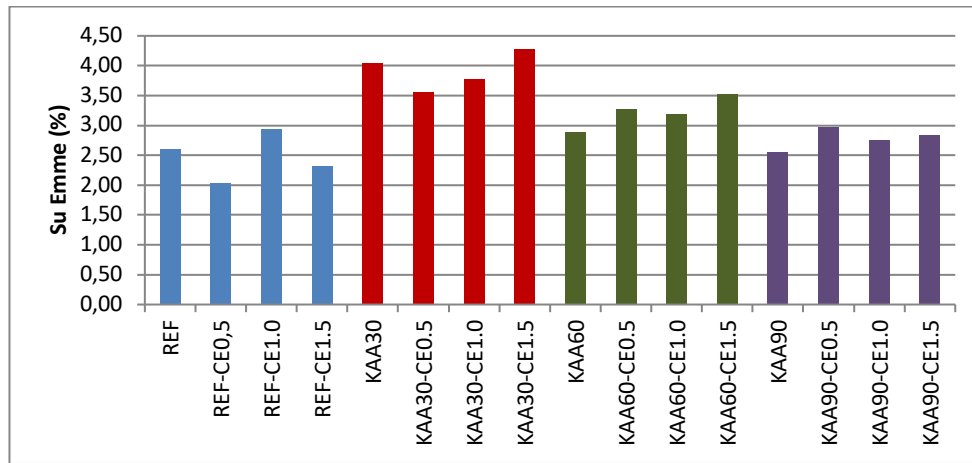
Şekil 5. Beton numunelerinin 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçları (7 and 28 days split tensile strength results of concrete Samples)

Üretilen beton numunelerine 28 günlük kür uygulamasının ardından BHA deneyi uygulanmıştır. Beton numunelerinin BHA değerleri Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde KAA ve CE ilavesi numunelerin BHA'yı düşürmüştür. REF numunesinin BHA 2514 kg/m³ iken, CE'nin 0.5, 1.0 ve 1.5 kg/m³ miktarında kullanılmasıyla BHA sırasıyla 2417, 2383 ve 2438 kg/m³ olarak belirlenmiştir. En düşük BHA 2246 kg/m³ değeri ile KAA60-CE1.5 numunesi, en yüksek ise 2514 kg/m³ değeri ile REF numunesi olmuştur.

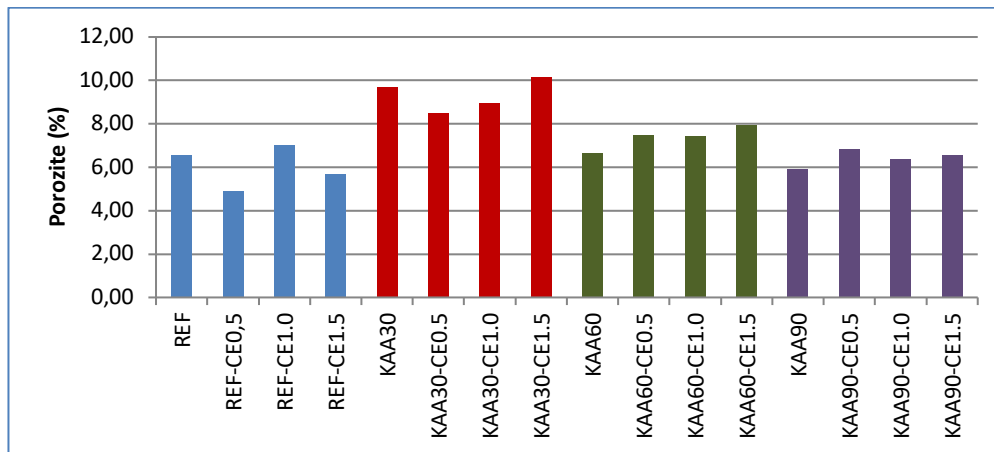


Şekil 6. Beton numunelerinin BHA değerleri (BHA (Unit Volume Weight) values of concrete Samples)

Üretilen beton numunelerine 28 günlük kür uygulamasının ardından su emme ve porozite deneyleri uygulanmıştır. Beton numunelerinin su emme yüzdeleri Şekil 7’de, porozite yüzdeleri ise Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 7’de verilen numunelerin su emme yüzdeleri incelendiğinde, KAA ikamesiyle su emme yüzdelerinde REF’e göre artış gözlemlenmiştir. Ancak KAA ikame oranlarını kendi içerisinde değerlendirdiğimizde KAA oranının artmasıyla su emme yüzdeleri azalmıştır. REF numunesinin su emme yüzdesi %2.61 iken, KAA30, KAA60 ve KAA90 numunelerinde su emme yüzdeleri sırayla %4.05, %2.89 ve %2.56 olmuştur. CE’nin 0.5 kg/m³ miktarında ilavesiyle su emme yüzdelerinde düşüş gözlemlenirken, daha yüksek miktarlarda kullanılan numunelerde artış meydana gelmiştir. Şekil 8’de verilen numunelerin porozite yüzdeleri incelendiğinde, KAA ikamesiyle porozite yüzdelerinde REF’e göre artış gözlemlenmiştir. REF numunesinde porozite yüzdesi %6.56 iken, KAA30, KAA60 ve KAA90 porozite yüzdeleri sırasıyla %9.70, %6.67 ve %5.93 şeklindedir. En düşük porozite yüzdesi %4.61 değeri ile REF-CE0.5, en yüksek porozite yüzdesi ise %10.16 değeri ile KAA30-CE1.5 olmuştur. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yapılan deneyler sonucunda, en ideal KAA oranının %30, CE miktarının ise 0.5 kg/m³ olduğu sonucuna varılmıştır. Kullanılan KAA’nın yüzeyinde bulunan asfalt atıkları ve doğal agregadan şekilsel olarak farklılıklarından kaynaklı betonda aderansı azalttığını daha boşluklu betonlar elde edilmesine ve dolayısıyla yüksek su emme yüzdelerine sebep olmuştur.

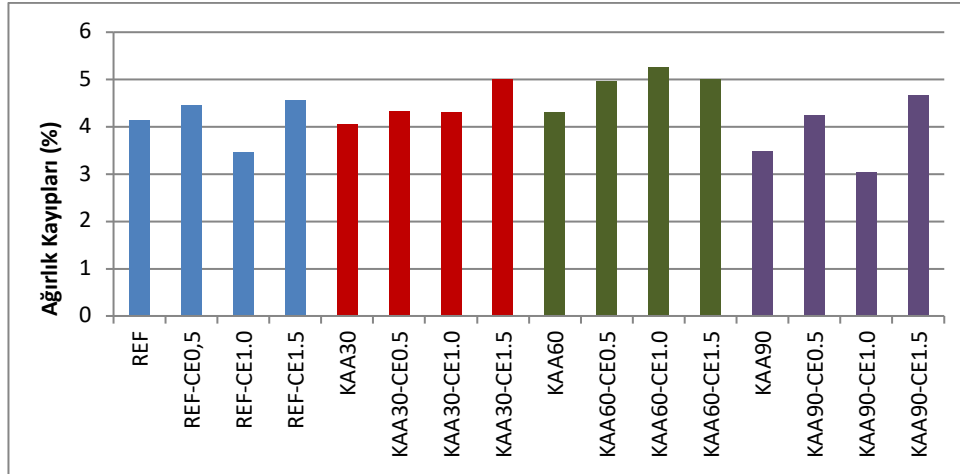


Şekil 7. Beton numunelerinin su emme değerleri (Water absorption values of concrete Samples)



Şekil 8. Beton numunelerinin porozite değerleri (Porosity values of concrete Samples)

Üretilen beton numunelerine 28 günlük kür uygulamasının ardından Böhme (aşınma) deneyi uygulanmıştır. Beton numunelerin Böhme (aşınma) deneyine ait sonuçları Şekil 9’da verilmiştir. Böhme (aşınma) deneyi sonucunda elde edilen beton numunelerin ağırlık kayıpları incelendiğinde, en yüksek ağırlık kaybı %5.25 değeri ile KAA60-CE1.0 numunesi, en düşük ağırlık kaybı ise %3.04 değeri ile KAA90-CE1 numunesinde meydana gelmiştir. KAA’nın %30 oranında ikamesiyle REF ile kıyaslandığında ağırlık kaybı azalırken, bu oranın artışı ile birlikte ağırlık kayıpları artmıştır. CE kullanım miktarının değişimi her bir REF ve KAA ikameli numunelerde farklı davranışlar elde edilmiştir. CE kullanılan beton numunelerin en düşük ağırlık kaybı KAA90-1.0 numunesinde %3.04, en yüksek ağırlık kaybı ise KAA60-1.0 numunesinde %5.25 olarak görülmüştür.



Şekil 9. Beton numunelerinin Böhme (aşınma) deneyi sonucu ağırlık kayıpları (Weight losses of concrete samples as a result of Böhme (abrasion) test)

4. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusions and Suggestions)

KAA ve CE ile üretilen betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması amacıyla yapılan deneysel çalışmaların sonuçları aşağıdaki gibidir.

- REF karışımlarına CE eklendikçe Slump (çökme) değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. KAA30, KAA60 ve KAA90 numunelerinde benzer sonuçlar görülmüş ve CE miktarı arttıkça Slump (çökme) değeri azalmıştır.
- Beton kür süresi arttıkça tüm numunelerin basınç dayanımlarında artış gerçekleşmiştir. REF ve KAA numunelerinde CE miktarı arttıkça basınç dayanımlarında genel olarak bir düşüş görülmektedir. KAA ikame oranının %30 olduğu KAA30 numunesinde basınç dayanımları REF numunesine oranla artarken, bu oranın %60 ve %90 çıkması durumunda basınç dayanım düşüşleri gerçekleşmiştir.
- Beton kür süresi arttıkça tüm numunelerin yarmada çekme dayanımlarında artış gerçekleşmiştir. CE 1.0 kg/m³ miktarında kullanıldığında yarmada çekme dayanımı artarken CE miktarının 1.5 kg/m³ kullanımıyla düşüşler gerçekleşmiştir. Genel olarak KAA ikame oranının artmasıyla birlikte yarmada çekme dayanımlarında düşüş görülmektedir.
- Mekanik özelliklerin belirlenmesi için yapılan deneyler sonucunda, en ideal KAA oranının %30, CE miktarının ise 1.0 kg/m³ olduğu sonucuna varılmıştır.
- KAA ikamesi ve CE ilavesi betonların boşluk miktarını arttırdığından BHA'larının düşmesine sebep olmuştur.
- KAA ikamesiyle su emme değerleri REF'e göre artış gözlemlenmiştir. Ancak KAA ikame oranlarını kendi içerisinde değerlendirildiğinde KAA oranının artmasıyla su emme değerleri azalmıştır. CE'nin 0.5 kg/m³ miktarında ilavesiyle su emme değerlerinde düşüş gözlemlenirken, daha yüksek miktarlarda kullanılan numunelerde artış meydana gelmiştir.
- KAA ikamesiyle porozite değerlerinde REF'e göre artış gözlemlenmiştir. Su emme değerleriyle benzer davranış göstermiştir.
- Fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yapılan deneyler sonucunda, en ideal KAA oranının %30, CE miktarının ise 0.5 kg/m³ olduğu sonucuna varılmıştır.
- KAA'nın %30 oranında ikamesiyle REF ile kıyaslandığında ağırlık kaybı azalırken, bu oranın artışı ile birlikte ağırlık kayıpları artmıştır. CE kullanım miktarının değişimi sonucu her bir REF ve KAA ikameli numunelerde farklı davranışlar elde edilmiştir. CE kullanılan beton numunelerinin en düşük ağırlık kaybı KAA90-1.0 numunesinde %3.04, en yüksek ağırlık kaybı ise KAA60-1.0 numunesinde %5.25 olarak görülmüştür.

Yapılan tüm deneyler sonucunda KAA'nın ikame oranı %30 ve CE kullanım miktarı 1.0 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Bu oran ve miktar belirlenirken uygulanan deneyler sonucunda beton numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurulmuştur. CE'nin miktarının 1.0 kg/m³ kullanılması durumunda basınç ve Böhme (aşınma) deneyi sonucunda ihmal edilebilir olumsuz etkisi

görülmesine rağmen diğer deney sonuçlarında görülen olumlu etkisi sayesinde ideal miktar olarak belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda gelecekte yapılacak olan çalışmalarda, bulunan sonuçlar doğrultusunda KAA ve CE kullanımıyla fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanısıra dayanıklılık özelliklerinin de çalışılabileceği önerilmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] S. V. Bittencourt, M. S. Magalhães, M. E. N. Tavares, "Mechanical Behavior And Water İnfiltration of Pervious Concrete İncorporating Recycled Asphalt Pavement Aggregate" *Construction Materials*, vol. 14, pp. e00473, 2021. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00473>
- [2] M. A. Kareem, A. A. Raheem, K. O. Oriola, R. Abdulwahab, "A Review on Application of Oil Palm Shell As Aggregate İn Concrete - Towards Realising A Pollution-Free Environment And Sustainable Concrete" *Environmental Challenges*, vol. 8, pp. 100531, 2022. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100531>
- [3] S. Erdem, M. A. Blankson, "Environmental Performance And Mechanical Analysis of Concrete Containing Recycled Asphalt Pavement (RAP) And Waste Precast Concrete As Aggregate" *Journal of Hazardous Materials*, vol. 264, pp. 403-410, 2014. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.040>
- [4] A. Adesina, S. Das, "Crack Properties, Toughness and Absorption Evaluation Of FRCC İncorporating Reclaimed Asphalt Pavement and Crumb Rubber As Aggregates" *Cleaner Materials*. vol. 1, pp. 100004, 2021. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100004>
- [5] A. Abbadi, P. A. M. Basheer, J.P. Forth, "Effect of Hybrid Fibres on The Static Load Performance of Concrete Beams" *Materials Today :Proceedings*, vol. 65, pp. 681-687, 2022. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.263>
- [6] H. Zhao, B. Jia, H. Huang, Y. Mou, "Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete" *Materials*. vol. 13, pp. 1362. 2020. doi:<https://doi.org/10.3390/ma13061362>
- [7] W. Lin, S. He, S. Qiao, Z. Xiang, Y. Qui, J. Zhang, J. Li, "Combined Effects of Expansive Agents and Glass Fibres on The Fracture Performance of Seawater and Sea-Sand Concrete" *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 1839-1859, 2022. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.019>
- [8] K. Zhao, L. Zhao, J. Hou, X. Zhang, Z. Feng, S. Yang, "Effect of Vibratory Mixing on The Slump, Compressive Strength, and Density of Concrete with The Different Mix Proportions" *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15 pp. 4208-4219, 2021. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.033>
- [9] B. Dündar, E. Çınar, H. Özkaya, "Profilit katkılı lifli harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi" *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, vol. 8 (2), pp. 17-27, 2019.
- [10] I. Hussian, B. Ali, T. Akhtar, M. S. Jameel, S. S. Raza, "Comparison of Mechanical Properties of Concrete and Design Thickness of Pavement With Different Types of Fiber-Reinforcements (Steel, Glass, and Polypropylene)" *Construction Materials*, vol. 13, pp. e00429, 2020. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>
- [11] B. Dündar, E. Çınar, S. Peşin, "Bazalt ve karbon lif takviyeli betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması" *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 10 (4) pp. 1039-1048, 2020.
- [12] S. Anandaraj, J. Rooby, P. O. Awoyera, R. Gobinath, "Structural Distress in Glass Fibre-Reinforced Concrete under Loading and Exposure to Aggressive Environments" *Construction and Building Materials*. vol. 197 pp. 862-870, 2019. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.090>
- [13] R. Soltanabadi, K. Behfarnia, "Shear Strength Of Reinforced Concrete Deep Beams Containing Recycled Concrete Aggregate And Recycled Asphalt Pavement" *Construction and Building Materials*. vol. 314, pp. 125597, 2022. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125597>
- [14] B. H. Mohammed, A. F. H. Sherwani, R. H. Faraj, H. H. Qadir, K. H. Younis, "Mechanical properties and ductility behavior of ultra-high performance fiber reinforced concretes: Effect of low water-to-binder ratios and micro glass fibers" *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12 (2) pp. 1557-1567, 2021. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.11.008>
- [15] A. Paktiawal, M. Alam, "Experimental Evaluation Of Sorptivity For High Strength Concrete Reinforced With Zirconia Rich Glass Fiber And Basalt Fiber" *Materials Today: Proceedings*, vol. 49 (5) pp. 1132-1140, 2021. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.008>
- [16] TS EN 197-1, Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, TSE, Ankara Türkiye, 2012.
- [17] TS EN 1008-2003, Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, TSE, Ankara Türkiye, 2003.

- [18] TS 706 EN 12620+A1, Beton agregaları, TSE, Ankara Türkiye, 2009.
- [19] TS 802-2016, Beton karışım tasarımı hesap esasları, TSE, Ankara Türkiye, 2016.
- [20] TS EN 12350-2, Beton- Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, TSE, Ankara Türkiye, 2019.
- [21] TS EN 12390-3, Beton – Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, TSE, Ankara Türkiye, 2019.
- [22] TS EN 12390-6, Beton- Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, TSE, Ankara Türkiye, 2010.
- [23] TS EN 1170-6. Ön yapımlı beton mamuller-Cam elyaf takviyeli çimento (ctç) deney metodu-Bölüm 6: Suya daldırma yoluyla su emme ve kuru yoğunluk tayini, TSE, Ankara Türkiye, 1999.
- [24] TS 2824 EN 1338/AC, Zemin döşemesi için beton kaplama blokları-Gerekli şartlar ve deney metotları, TSE, Ankara Türkiye, 2009.
- [25] M. Amin, B. A. Tayeh, İ. S. Agwa, "Investigating The Mechanical And Microstructure Properties of Fibre-Reinforced Lightweight Concrete under Elevated Temperatures" *Construction Materials*. vol. 13, pp. e00459, 2020. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00459>
- [26] N. Hossiney, H. K. Sepuri, M. K. Mohan, H. R. Arjun, S. Govindaraju, J. Chyne, "Alkali-Activated Concrete Paver Blocks Made with Recycled Asphalt Pavement (RAP) Aggregates" *Construction Materials*. vol. 12, pp. e00322, 2020. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00322>
- [27] Y. Khodair, M. Raza, "Sustainable Self-Consolidating Concrete Using Recycled Asphalt Pavement and High Volume of Supplementary Cementitious Materials" *Construction and Building Materials*. vol. 131, pp. 245-253, 2017. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.044>
- [28] Z. Marcalikova, M. Racek, P. Mateckova, R. Cajka, "Comparison of Tensile Strength Fiber Reinforced Concrete With Different Types of Fibers" *Procedia Structural Integrity*. vol. 28, pp. 950-956, 2020. doi:<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.068>
- [29] Ü. Yurt, "An experimental study on fracture energy of alkali activated slag composites incorporated different fibers" *Journal of Building Engineering*, vol. 32, pp. 101519, 2020. doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101519>
- [30] S. Ahmad, A. Umar, A. Masood, "Properties of Normal Concrete, Self-compacting Concrete and Glass Fibre-reinforced Self-compacting Concrete: An Experimental Study" *Procedia Engineering*. vol. 173, pp. 807-813, 2017. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.106>

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Automatic Sleep Staging by EEG and 2D-Convolutional Neural Network

Ibrahim Kaya^{a*}

Submitted: 27.12.2021 Revised: 05.07.2022 Accepted: 27.10.2022 doi:10.30855/gmbd.0705037

ABSTRACT

Keywords: Automatic sleep staging, EEG, Deep learning, Convolutional Neural Network (CNN)

^{a,*} İzmir Katip Celebi University, Faculty of Engineering and Architecture, Dept. of Biomedical Engineering 35620 - İzmir, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0802-4376
e mail: ibrahimkaya21@yahoo.com

*Corresponding author:
ibrahimkaya21@yahoo.com

Sleep disorders have high prevalence and cause various health problems. For the diagnostics of these disorders and assessment of the sleep quality, many physiological data are collected using polysomnogram (PSG) method. The most important PSG data is the EEG recorded from the brain during sleep. Analysis of hours of sleep EEG data by experts is an onerous task which requires high attention. Recently, many automatic sleep staging classifiers using EEG are developed in order to prevent human error, and to provide a quick objective analysis. They use machine learning techniques and predict the sleep stage of each EEG epoch. Compared to traditional machine learning, deep learning which requires no hand-crafted feature extraction was able to classify sleep stages better. 1D Convolutional Neural Networks (CNN) are the main methods used in automatic sleep staging recently. In this research a simple 2D-CNN based automatic sleep staging feasibility is investigated. It has been found that a 2D CNN can classify the sleep stages by accuracy of 92.55% and with a Cohen's kappa of 0.82.

EEG ve 2 Boyutlu Evrişimsel Sinir Ağları Aracılığıyla Otomatik Uyku Evre Tayini

ÖZ

Uyku bozuklukları toplumda oldukça yaygın görülmekle birlikte çeşitli sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Bu bozuklukların teşhis edilmesi ve uyku kalitesinin belirlenmesi için Polisomnogram metodu ile birçok fizyolojik veri toplanır. En önemli veri uyku halinde beyinden kaydedilen EEG verisidir. Saatler süren uykuya ait EEG verilerinin uzmanlar tarafından analiz edilmesi yüksek dikkat isteyen çok zahmetli bir iştir. Son zamanlarda insan hatalarını önlemek ve hızlı nesnel bir analiz gerçekleştirmek amacıyla EEG sinyallerini kullanan otomatik uyku evre sınıflandırıcıları geliştirilmiştir. Bu sınıflandırıcılar makine öğrenmesi yöntemlerini kullanır ve her bir EEG kesitine dair uyku evresini tahmin eder. Geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla elle hiçbir öznitelik çıkarımı gerektirmeyen derin öğrenme uyku evre sınıflandırmasında daha başarılı olabilmektedir. Son zamanlarda, tek boyutlu evrişimsel sinir ağları otomatik uyku evre sınıflandırmasında ana yöntem olmuştur. Bu araştırmada iki boyutlu basit bir evrişimsel sinir ağlarına dayalı otomatik uyku evre sınıflandırılmasının uygulanabilirliği incelenmiştir. İki boyutlu evrişimsel sinir ağlarının %92.5 doğruluk ve 0.82 Cohen Kappa değeri ile sınıflandırmabildiği bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Otomatik uyku evresi sınıflandırma, EEG, Derin öğrenme, Evrişimli sinir ağları

1. Introduction

Sleep is a vital process for human health and function. Correct and early diagnosis of sleep problems is critical. Sleep staging is used to diagnose sleep disorders. It is done by collecting diagnostic data from subjects during sleep and evaluation by sleep experts. Overnight polysomnogram (PSG) is a gold standard method to investigate the quality of sleep and rate the sleep stages [1]. In PSG, many sensors are connected to the subject and various data such as EEG, EOG, EMG, ECG, respiratory efforts, airflows, and blood oxygenation are collected [2]. EEG is the most widely used reliable data related with the brain activity. Human sleep consists of repetitions of six different stages which are; wakefulness (W), 4 Non Rapid Eye Movement (REM) stages (S1-S4), and REM sleep as described by Rechtschaffen and Kales (R&K) [3-4]. Typical sleep stage EEG rhythms for Wake, S1 to S4 and REM sleep are shown in Figure 1. Each colored plot is a typical 30second EEG signal of particular sleep stage. A night sleep usually involves 90 minutes cycles of N2, N3, REM and N1 [5]. This cycle repeats 4-5 times in one night sleep.

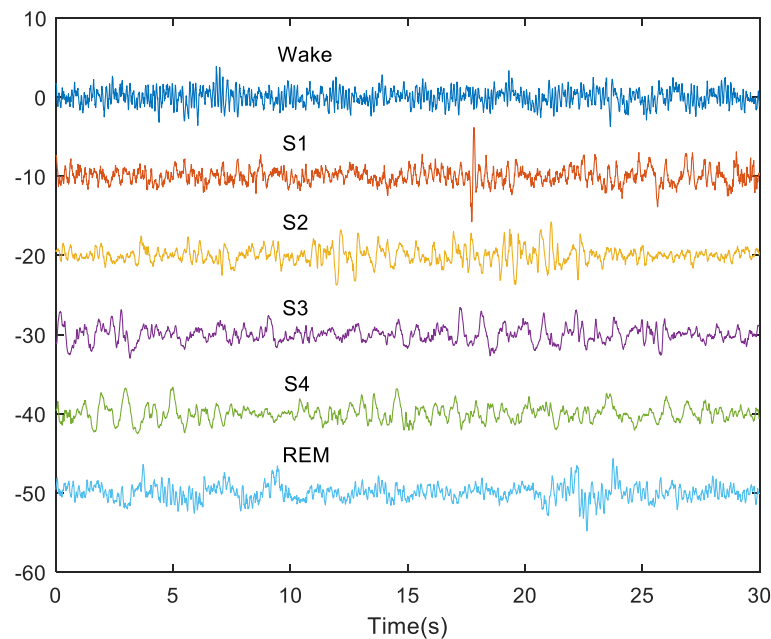


Figure 1. Six different sleep stages according to R&K.

In the sleep staging various features such as K-complexes, spindles, alpha bursts, amplitudes, frequency content, EMG level, eye movements are used [6]. In a typical PSG, EEG data is segmented with 30s epochs and each epoch is classified as one of the 6 stages of sleep. However, the American Academy of Sleep Medicine (AASM) has another standard suggesting grouping sleep epochs into 5 distinct sleep stages [7]. Sleep staging used to be done by inspection of each epoch by a trained sleep expert, however since PSG data contains many hours of information it is very time consuming and prone to mistakes. Therefore, some sort of automatic sleep staging is required. While manual feature extraction based machine learning methods have reasonable performances in the automatic sleep staging by EEG, there exist some limitations such as prior knowledge and inability to generalizing to broader datasets and different subjects [8]. Thus, deep learning methods become a better alternative, since they do not require the hand crafted feature extraction and can be generalized to new different data easily.

In the sleep staging various features such as K-complexes, spindles, alpha bursts, amplitudes, frequency content, EMG level, eye movements are used [6]. In a typical PSG, EEG data is segmented with 30s epochs and each epoch is classified as one of the 6 stages of sleep. However, the American Academy of Sleep Medicine (AASM) has another standard suggesting grouping sleep epochs into 5 distinct sleep stages [7]. Sleep staging used to be done by inspection of each epoch by a trained sleep expert, however since PSG data contains many hours of information it is very time consuming and prone to mistakes. Therefore, some sort of automatic sleep staging is required. While manual feature extraction based machine learning methods have reasonable performances in the automatic sleep staging by EEG, there exist some limitations such as prior knowledge and inability to generalizing to broader datasets and

different subjects [8]. Thus, deep learning methods become a better alternative, since they do not require the hand crafted feature extraction and can be generalized to new different data easily.

2. Materials and Method

2.1. Dataset

The data is obtained from the sleep-edfx expanded database on physionet [12]. The dataset contains 197 whole-night PSG sleep recordings, however only the first 20 subject recordings are used, because there is a clear subject age difference between the first 20 subjects and the rest. The selected dataset consists of two PSG files for each of 20 subjects with ages ranging from 25 to 34. Each subject recordings took place during two consecutive day and night periods, except subject 13 who had only one night data. Also each PSG file is associated with a hypnogram file which basically labels the data epochs as Wake, REM, Stage 1, Stage 2, Stage 3, Stage 4, M (Movement time) and ? (not scored) according to R&K sleep staging method. In PSG data there are four electrode recordings from two EEG channels Fpz-Cz and Pz-Oz, one EOG and one EMG channels. In addition, there are Resporonasal, EMGSubmenta, Tempbody, and Eventmarker in the data. In this study, two channels of EEG data from Fpz-Cz and Pz-Oz electrodes are exploited. The sampling rate is 100Hz and one sleep EEG epoch contains 3000 time series data points corresponding to 30s. Epochs labelled as M and ? are excluded from the dataset because they are artifacts. The sleep data stages are converted from 6 stage R&K standard to conventional AASM staging standard of 5 sleep stages by combining the stages 3 and stages 4 as non-REM3 (N3). In AASM there are Wake ,three non-REM N1, N2, N3 stages and a REM stage. The distribution of sleep stages in the dataset is not even and this is a major problem with the proper training of the network.

The hold out method is used to separate the test and train data. The first 14 subjects, Subjects S0 to S14 (excluding S13) are included in the training set and remaining 5 subjects (S15-S19) are grouped as the test dataset. Following the training, the model is tested with the data that has never been used in training.

2.2. Method

2.2.1 Image formation

In MATLAB environment, a single dimensional time series EEG signal is converted into a 2D image to fit the input format and to train 2D CNN model as shown in Figure-2. EEG sleep epochs of 30s or 3000 data points from Fpz-Cz channel are reshaped into 50x60x1. Similarly another image color layer is created by subtracting the 30s, 3000 data points of Pz-Oz from the Fpz-Cz channel data and assigned as the second color of the 50x60x2 image. This subtraction which a basic spatial filtering, cancelled the common background activity between Fpz-Cz and Pz-Oz electrodes.

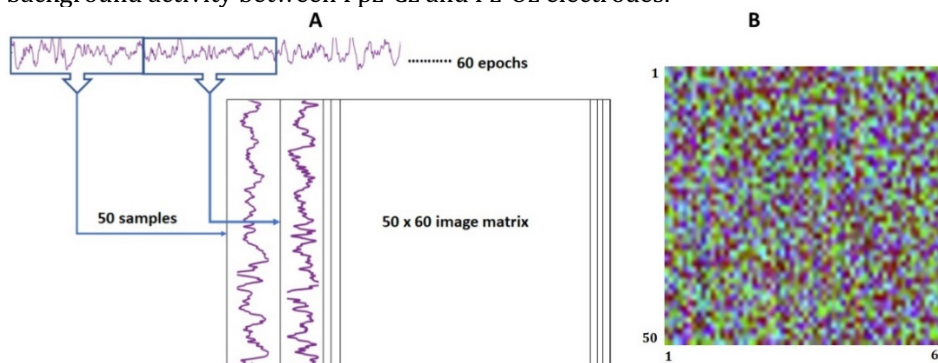


Figure 2. (A) 2D image from EEG data. (B) A 50 x 60 pixel image from one EEG time series data. Signal values are set as the image pixel colors. Additional color is added to the image using the subtraction of Pz-Oz and Fpz-Cz EEG data as the second color.

2.2.2 Two-Dimensional convolution neural network (2D-CNN)

In CNN architecture, first a 2D convolution layer is used to extract the features from the images. It applies sliding convolutional filters to 2D input. Batch normalization layer is used between

convolutional layers and ReLU to speed up training of the convolutional neural network and reduce the sensitivity to network initialization. ReLU layer is used as the activation function between layers in order to account for nonlinearity of the network. It replaces all the negative pixel values with zeroes. A 2-D max pooling layer is inserted after ReLU layers to perform downsampling of the input images. It divides the input into rectangular pooling regions then computes the maximum of each region. Therefore the number of parameters and computational load in the network is reduced and overfitting can be controlled. In the full connected layer, the input is multiplied by a weight matrix and then bias vector is added. Fully connected layer uses all of the features from the previous layers across the image to recognize the larger patterns. These layers are repeated four times to increase the complexity of the model. Finally softmax layer together with a classification layer assigns the sleep stage with the highest probability as the output of the classifier. The overall diagram of the 2D CNN model is given in Figure-3. The number of convolutional level can be reduced further to minimize the complexity and the number of parameters. The filter sizes, paddings, strides can be optimized.

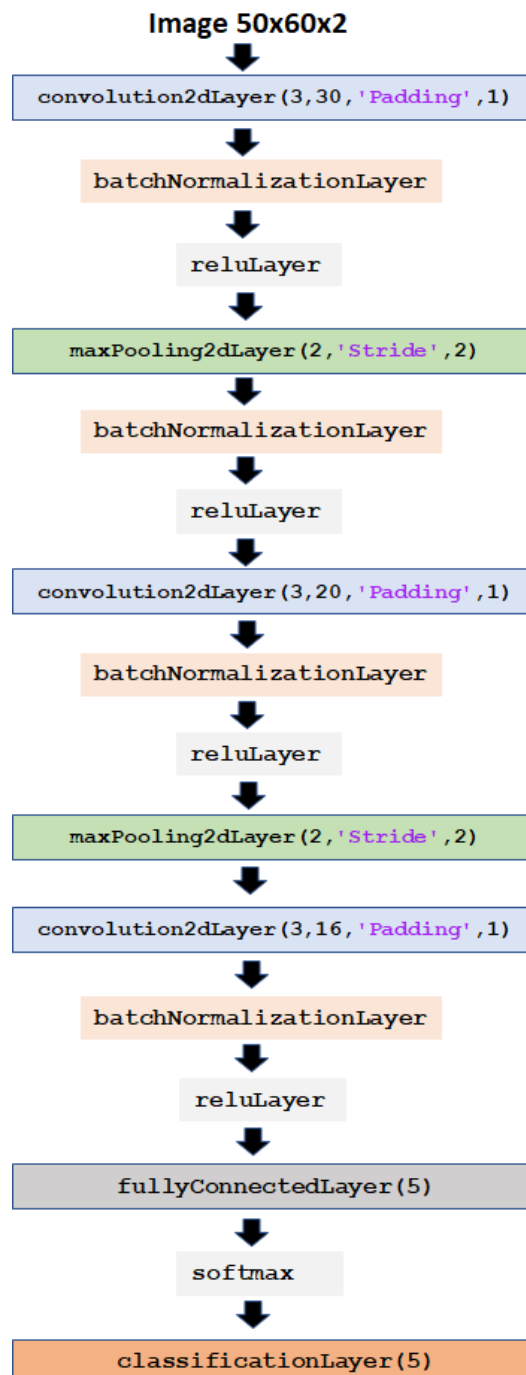


Figure 3. 2D CNN model for sleep staging.

3. Research Findings

The results are evaluated by the accuracy, precision, recall, F1-score, and Cohen's Kappa (K) values that are computed for the test group, namely Subjects 15-19. These are the main performance metrics in literature for machine learning and particularly automatic sleep staging [13]. The formulas for calculation of the above mentioned metrics are given in equations (1) (2) (3) (4) (5) in order [13]. Accuracy Precision and Recall are computed using the True Positives (TP), True Negatives (TN), False Positives (FP) and False Negative (FN) values from the confusion matrix. F1 score is computed with Precision and Recall. Cohen's Kappa is a measure of interraters performances, how well is the classification result in agreement with the correct labels. Inter-rater agreement of standard EEG scorings between international sleep centers is above 0.70. In (5) N is the number of sleep epochs, x values are the cell values in the confusion matrix for each row i and column j.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

$$F1 - score = \frac{2 Precision Recall}{Precision+Recall} \quad (4)$$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ii} \sum_{i=1}^n x_{ii} \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} \sum_{j=1}^n x_{ji} \right)}{N \frac{\sum_{i=1}^n x_{ii} \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} \sum_{j=1}^n x_{ji} \right)}{N^2}} \quad (5)$$

In Table 1, each cell shows the number of epochs from the labelled by the expert as the row label and classified as column label by the 2D CNN model. The data is not uniformly distributed. Wake state dominates the EEG data. The probabilities of each sleep state is given in Table 2. N2 follows the dominant Wake state by probability of 17%. High F1 score for Wake emphasizes the classification performance of the method, however N1 is not correctly classified. The low F1 in the classification of N1 is observed in other studies as well [13].

Table 1. The confusion chart for the test data is given. The true sleep stage distribution is given as sleep stage epoch counts and the corresponding predicted sleep stage epoch counts.

		Predicted				
		Wake	N1	N2	N3	REM
True	Wake	17633	60	72	9	269
	N1	175	106	86	1	252
	N2	152	60	3832	262	353
	N3	3	3	183	1539	0
	REM	231	122	285	1	1595

Table 2. Classification performances for each sleep stage are given as stage, probability, recall, precision and F1 Scores.

Stage	Prob.	Recall	Precision	F1-score
Wake	0.66	0.98	0.97	0.97
N1	0.02	0.17	0.30	0.22
N2	0.17	0.82	0.86	0.84
N3	0.06	0.89	0.85	0.87
REM	0.08	0.71	0.65	0.68
Macro	1.00	0.72	0.73	0.72

The classification performances for the test dataset are given in Table 3. The mean accuracy of the method using the test dataset is 90.55%. The interrater Cohen's Kappa value K is found between 0.74

and 0.89, higher than the acceptable 0.7 level. Subject 15 performance values are the highest, 94.63% accuracy and 0.89 Cohen's Kappa.

Table 3. Accuracy and Cohen's kappa values for test subjects.

Subject	Accuracy (%)	Cohen's Kappa (K)
S15	94.63	0.89
S16	89.63	0.80
S17	86.14	0.74
S18	92.66	0.84
S19	89.59	0.82
Mean	90.55	0.82

4. Discussion

The results of this study are compared with the state of the art methods in the literature given in Table 4. It can be seen that, while this approach has high classification accuracy compared to the other methods, it lacks the F1 score due to the data imbalance problem. One of the problems with the low performance of the other researches is the subjective determination of the sleep classes by experts. Xu et al. found that sleep dataset annotation may be inaccurate due to high workload of the sleep experts [14]. Therefore this also deteriorates the automatic classification performance. Another point is the high misclassification of the N1 stage, this is attributed to the extremely small percentage of the N1 stage in the dataset and the similarity between N1 and REM stages [14]. Although Salamatian & Khadem developed a 1D CNN and obtained great accuracy, however the confusion matrix that is provided is from a very small data [21]. Deep learning method (1D CNN) presented in Yildirim et al. 2019 study achieved 90.98 % accuracy however they used EOG channel in addition to EEG [22].

Table 4. Results of the deep learning studies in this field.

Study	Method	Macro F-1	Cohen's kappa	Accuracy %
Xu et al. [14]	1D-CNN	81.18	0.80	85.53
Tsinalis et al. [15]	1D-CNN	84		78.9
Cai et al. [16]	Dual input 1D-CNN	-	0.80	87.21
Phan et al. [11]	Joint 2D-CNN		0.75	81.9
Supratak et al. [17]	CNN + Bidirectional LSTM	76.9	0.76	82
Fu et al. [18]	CNN + Bidirectional LSTM	82.14	0.77	83.78
Mousavi et al. [19]	1D-CNN	79.66	0.79	84.26
Khalili & Asl [20]	TCNN + CRF	79.29	0.80	85.39
Salamatian & Khadem [21]	1D-CNN	-	-	94.09
Zhou et al. [13]	1D-CNN	-	0,81	86.1
Jia et al. [23]	Dilated CNN	0.83	-	-
Nie et al. [24]	CNN+RNN	0.81	-	-
This study	2D-CNN	72.00	0.82	90.55

5. Conclusion

This study demonstrates the efficient use of a simple 2D CNN in automatic sleep staging. The overall sleep stage epochs and the corresponding prediction states that are given in Table-1 show that Wake and N3 stages are accurately predicted with the method. The performances of each sleep stage are given in Table-2 shows this performance in terms of performance metrics. Except for N1 stage the performance metrics highlight the accuracies of the method. It achieved performance comparable to the state of the art methods, however there are differences in the data and preprocessing steps. In future studies, first I am interested in optimizing the 2D image matrix generation Then I want to evaluate the efficacy of the method on the in-bed data only, and broader sleep-edfx dataset or alternative datasets. I am also interested in incorporating multiple PSG data such as EOG EMG into the

deep learning 2D CNN algorithm. Moreover, I want to tackle the problem of data imbalance which prevents the proper classification of N1 stage. Another direction could be comparison of the possible electrode channels and spatial filtering approaches before applying CNN architecture.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] W. H. Spriggs, *Essentials of Polysomnography: A Training Guide and Reference for Sleep Technicians*, Burlington, MA, USA: Jones & Bartlett Learning, 2014.
- [2] H. Schulz, "Rethinking sleep analysis," *Journal of Clinical Sleep Medicine*, vol. 4, no. 2, pp. 99–103, 2008. doi:10.5664/jcsm.27124
- [3] T. Hori, Y. Sugita, E. Koga et al., Proposed supplements and amendments to "A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects", the Rechtscha_en & Kales (1968) standard," *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, no. 55, pp. 305–310. 2001.
- [4] D. W. Carley and S. S. Farabi, "Physiology of sleep," *Diabetes Spectrum*, vol. 29, no. 1, pp. 5–9, 2016. doi:10.2337/diaspect.29.1.5
- [5] G. Z. Özen, R. Sultanov, Y. Özen and Z. Y. Güneş, "A Convolutional Neural Network Based on Raw Single Channel EEG for Automatic Sleep Staging," *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 149-158, 2020. doi:10.35377/saucis.03.02.731628
- [6] K. Šušmákov, "Human sleep and sleep EEG," *Measurement science review*, vol. 4, no. 2, pp. 59-74, 2004.
- [7] R. B. Berry, R. Brooks, C. E. Gamaldo, S. M. Harding, C. Marcus and B. V. Vaughn, "The AASM manual for the scoring of sleep and associated events," *Rules, Terminology and Technical Specifications, Darien, Illinois, American Academy of Sleep Medicine*, no. 176, 2012.
- [8] Z. Mousavi, T. Yousefi Rezaii, S. Sheykhivand et al., "Deep convolutional neural network for classification of sleep stages from single-channel EEG signals," *Journal of neuroscience methods*, vol. 324, 2019. doi:10.1016/j.jneumeth.2019.108312
- [9] A. Craik, Y. He, J. L. Contreras-Vidal, "Deep learning for electroencephalogram (EEG) classification tasks: a review," *Journal of neural engineering*, vol. 16, no. 3, 2019. Art. doi:10.1088/1741-2552/ab0ab5
- [10] M. Bojarski, D. Del Testa, D. Dworakowski et al., "End to end learning for self-driving cars," *arXiv preprint arXiv:1604.07316*, 2016. doi:10.48550/arXiv.1604.07316
- [11] H. Phan, F. Andreotti, N. Cooray, O. Y. Chén and M. De Vos, "Joint Classification and Prediction CNN Framework for Automatic Sleep Stage Classification," in *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 66, no. 5, pp. 1285-1296, 2019, doi:10.1109/TBME.2018.2872652.
- [12] B. Kemp, A. H. Zwinderman, B. Tuk, H. A. C. Kamphuisen and J. J. L. Obery, "Analysis of a sleep-dependent neuronal feedback loop: the slow-wave microcontinuity of the EEG," in *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 47, no. 9, pp. 1185-1194, Sept. 2000, doi: 10.1109/10.867928.
- [13] D. Zhou, J. Wang, G. Hu, et al. "Singlechannelnet: A model for automatic sleep stage classification with raw single-channel EEG," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 75, 2022.
- [14] K. Xu, S. Xia, G. Li, "Automatic Classification of Sleep Stages Based on Raw Single-Channel EEG," in *Chinese Conference on Pattern Recognition and Computer Vision (PRCV)*, October-16, 2020, Cham: Springer, 2020. pp. 356-368. doi:10.1007/978-3-030-60639-8_30
- [15] O. Tsnalis, P. M. Matthews, Y. Guo et al. "Automatic sleep stage scoring with single-channel EEG using convolutional neural networks," *arXiv preprint arXiv:1610.01683*, 2016. doi:10.48550/arXiv.1610.01683
- [16] Q. Cai, Z. Gao, J. An, S. Gao and C. Grebogi, "A Graph-Temporal Fused Dual-Input Convolutional Neural Network for Detecting Sleep Stages from EEG Signals," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 68, no. 2, pp. 777-781, 2021. doi:10.1109/TCSII.2020.3014514.
- [17] A. Supratak, H. Dong, C. Wu and Y. Guo, "DeepSleepNet: A Model for Automatic Sleep Stage Scoring Based on Raw Single-Channel EEG," in *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 25, no. 11, pp. 1998-2008, 2017. doi:10.1109/TNSRE.2017.2721116.
- [18] M. Fu, Y. Wang, Z. Chen et al., "Deep Learning in Automatic Sleep Staging With a Single Channel Electroencephalography," *Front. Physiol*, vol. 12, no. 628502. doi:10.3389/fphys.2021.628502

- [19] S. Mousavi, F. Afghah, U. R. Acharya, "SleepEEGNet: Automated sleep stage scoring with sequence to sequence deep learning approach," *PloS one*, vol. 14, no. 5, 2019. doi:10.1371/journal.pone.0216456
- [20] E. Khalili and B. M. Asl, "Automatic sleep stage classification using temporal convolutional neural network and new data augmentation technique from raw single-channel EEG," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 204, 2021. doi:10.1016/j.cmpb.2021.106063
- [21] A. Salamatian and A. Khadem, "Automatic sleep stage classification using 1D convolutional neural network," *Frontiers in Biomedical Technologies*. vol. 7, no. 3, pp. 142-150, 2020. doi:10.18502/fbt.v7i3.4616
- [22] O. Yildirim, U. B. Baloglu and U. R. Acharya, "A Deep Learning Model for Automated Sleep Stages Classification Using PSG Signals," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, no. 4, pp. 599, 2019. doi:10.3390/ijerph16040599
- [23] Z. Jia, Y. Lin, J. Wang et al., "SalientSleepNet: Multimodal salient wave detection network for sleep staging," *arXiv preprint arXiv:2105.13864*, 2021. doi:10.48550/arXiv.2105.13864
- [24] H. Nie, S. Tu and L. Xu, "RecSleepNet: An Automatic Sleep Staging Model Based on Feature Reconstruction," in *2021 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*, pp. 1458-1461, 2021. doi:10.1109/BIBM52615.2021.9669687.

* Bu makale *International Conference on Engineering Technologies-ICENTE 21* isimli konferansta sunulmuş bildirinin genişletilmiş halidir.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Removal of Astrazon Blue in The Electro-Fenton System with Thermally Modified Biochar Electrodes Prepared from Pyrolysis of Waste Biomass

Başak Temur Ergan^{a*}, Ebubekir Sıddık Aydın^b, Erhan Gengec^c

Submitted: 26.07.2022 Revised: 13.10.2022 Accepted: 27.10.2022 doi:10.30855/gmbd.0705038

ABSTRACT

In this study, Firstly, an Electro-Fenton (EF) system was established by converting the biochar products obtained by pyrolysis from the mixed furniture waste biomass to electrodes of without modification (raw) and after thermal modification. The modification variables of biochars were determined as: gas type (N₂,CO₂), temperature (500-900°C) and time (1-4 h). In the EF system, the effects of modified biochar electrodes used as cathodes on peroxide production-current efficiency (CE) and dye removal efficiency were examined and the most effective biochar electrode and modification conditions were determined. In the study, pH:3, EF time: 0.5 hours, cathodic potential:2 V, catalyst (FeSO₄) concentration:0.2 mM, electrolyte (Na₂SO₄) concentration: 50 mM as EF conditions and Astrazon blue aqueous solution (50 mg/L) were chosen as a model contaminant. Among the electrodes, the most effective electrode was determined as the electrode (CO₂-700-1), which was thermally modified in CO₂ gas at 700°C for 1 hour. In addition, the energy efficiency and economic results of the study were analyzed. When the electrodes are evaluated in terms of treatment cost for 100% dye removal in the EF system, it is found that the treatment cost obtained with the electrode (CO₂-700-1) is 68.2% lower than the raw electrode (N₂-350-4). It was observed that the dye removal efficiency of the regenerated electrode did not change after 10 cycles.

Keywords: Waste biomass, Pyrolysis, Thermal modification, Electro-Fenton, Astrazon Blue

^{a*} Gebze Technical University,
Dept. of Chemical Engineering,
Kocaeli, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0708-5102
e mail: btemur@gtu.edu.tr

^b Sivas University of
Science and Technology,
Dept. of Chemical Engineering,
Sivas, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8704-4502

^c Kocaeli University,
Dept. of Environmental
Protection and Control,
Kocaeli, Türkiye
Orcid: 0000-0003-3666-0791

*Corresponding author:
btemur@gtu.edu.tr

Atık Biyokütlenin Pirolizinden Hazırlanan Termal Modifiye Biyoçar Elektrotlar ile Elektro-Fenton Sisteminde Astrazon Blue Giderimi

ÖZ

Bu çalışmada öncelikle karışık mobilya atığı olan biyokütleden piroliz ile elde edilen biyoçar ürünlerin modifikasyonsuz (ham) ve termal modifikasyondan sonra elektrotlara dönüştürülmesiyle bir Elektro-Fenton (EF) sistemi kuruldu. Biyoçar ürünlerin modifikasyon değişkenleri, gaz türü (N₂, CO₂), sıcaklık (500-900°C) ve süre (1-4 sa) olarak belirlendi. Kurulan EF sisteminde katot olarak kullanılan modifiye biyoçar elektrotların, peroksit üretimi-akım verimliliği (CE) ve boya giderim verimi üzerine etkileri incelenerek en etkin biyoçar elektrot ve modifikasyon şartları belirlendi. Çalışmada, pH:3, EF süresi: 0,5 saat, katodik potansiyel:2 V, katalizör (FeSO₄) konsantrasyonu: 0,2 mM ve elektrolit (Na₂SO₄) konsantrasyonu: 50 mM deneysel EF şartları olarak, 50 mg/L konsantrasyonundaki Astrazon blue sulu çözeltisi ise model kirletici olarak seçildi. Bu deneysel şartlar altında incelenen biyoçar elektrotlar arasından boya giderimi, peroksit üretimi ve akım verimliliği (CE) açısından en etkin elektrot, CO₂ gazında 700°C'de 1saat süreyle termal modifikasyonu yapılan elektrot (CO₂-700-1) olduğu belirlendi. Ayrıca, çalışmanın enerji verimliliği ve ekonomik sonuçları da analiz edildi. Elektrotlar, EF sisteminde, %100 boya giderimi için arıtma maliyeti açısından değerlendirildiğinde seçilen elektrot (CO₂-700-1) ile elde edilen arıtım maliyetinin, ham (N₂-350-4) elektrota göre %68,2 daha düşük olarak bulundu. Buna ek olarak, 10 çevrim sonunda rejenere elektrotta boya giderme veriminin değişmediği görüldü.

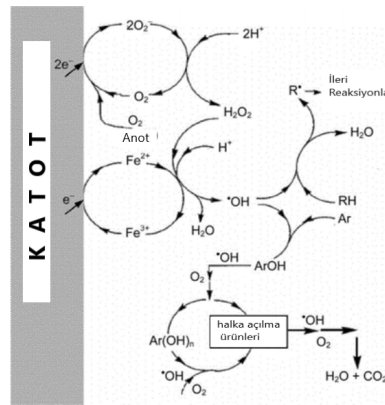
Anahtar Kelimeler: Atık biyokütle, piroliz, Termal modifikasyon, Elektro-Fenton, Astrazon Blue

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde yaşamsal kaynakların hızlı bir şekilde tükenmesi ve kirlenmesinden dolayı kaynaklarımız gelecekte yok olma tehlikesi ile karşı karşıyadır. Bu önemli kaynaklardan biri de sudur. Kullanılan su, atık su olarak karşımıza çıkmakta ve bunun arıtılıp geri kazanılması yüksek önem arz etmektedir. Ayrıca arıtım yaparken kullanılan kimyasallar ve harcadığımız enerji de maliyet ve kullanım açısından önemlidir.

Özellikle 20. yüzyılın son yarısından itibaren başlayan çevre duyarlılıkları, bilim insanlarını daha etkili ve avantajlı atık su arıtma metotlarının geliştirilmesi konusunda çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir. Söz konusu bu çalışmaların temel hedefi düşük enerji ve maliyet gereksinimi olan sürdürülebilir metotların ve araçların geliştirilmesidir. Bu noktada, İleri Oksidasyon Prosesleri (İOP), üzerine en yoğun çalışılan arıtma prosesleridir. İOP'lerden biri olan Elektro-oksidadasyon (EO) prosesi en fazla çalışılan alanlardan biridir. EO prosesini giderim mekanizması bakımından direkt ve indirekt oksidasyon olarak sınıflandırmak mümkündür. Direkt oksidasyonda kirletici, direkt elektrot yüzeyinde elektron transferine maruz kalır veya elektrot yüzeyinde oluşan radikallerce (genellikle hidroksil radikali, $\bullet\text{OH}$) okside edilir. Diğer taraftan indirekt oksidasyonda; su fazında bir oksitleyici tür (Cl_2 , HOCl , OCl , ClO_2 , O_3 , H_2O_2 , gibi) oluşur ve kirletici; oluşan bu oksidan tarafından okside edilir. Söz konusu her iki oksidasyon çeşidi de proseste anot elektrot vasıtasıyla gerçekleşebilir. Ancak katot vasıtasıyla sadece indirekt oksidasyon gerçekleşmektedir. Üstelik katodik oksidasyon genellikle düşük voltajlarda daha yüksek arıtım verimleri sağlamaktadır. Katotta oksijen molekülünün indirgenmesi sonucu hidrojen peroksit (H_2O_2) üretilir. Üretilen hidrojen peroksit ve ortama katalizör olarak verilen $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ iyonları sayesinde hidroksil radikalleri oluşur. Bu proses hidrojen peroksitin katotta üretilmesi dışında klasik Fenton prosesi ile aynı olduğu için Elektro-Fenton (EF) ismini almaktadır [1].

EF prosesinde $\bullet\text{OH}$ radikallerinin üretimi ve gerçekleşen önemli reaksiyonlar şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Özetle EF prosesinin en büyük avantajı H_2O_2 'in sistem içinde üretilmesi ve katalizörün rejenerasyonudur [1].



Şekil 1. EF Prosesinde $\bullet\text{OH}$ radikallerinin üretimi ve gerçekleşen önemli reaksiyonlar
(Production of $\bullet\text{OH}$ radicals and important reactions in the EF Process)

EF prosesinde, sistemde kullanılacak olan elektrotun seçiminde yüksek arıtım verimleri sağlayan karbon bazlı elektrotlar, kimyasal dayanıklılık, kolay ulaşılabilirlik ve düşük maliyetleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Ayrıca, düşük potansiyel değerlerinde yüksek H_2O_2 oluşumuna imkân veren yapısı, karbon bazlı elektrotları ön plana çıkarmıştır. Grafit, karbon keçe, karbon fiber, grafen, karbon siyahı, biyoçar bu amaçla en çok kullanılan karbon temelli malzemelerdir [2–8]. Buna paralel olarak; karbon bazlı materyallerin yüzey alanı, elektriksel iletkenlik ve katalitik özelliklerinin fiziksel ve kimyasal modifikasyon süreçleri sonunda geliştirilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir [6], [9–12]. Ancak bu süreçlerden, fiziksel (termal) modifikasyonun proses şartlarının (inert gaz cinsi, modifikasyon sıcaklığı ve modifikasyon süresi gibi) EF prosesinde kullanılan karbon elektrotların verimliliği üzerine sistematik çalışmalar mevcut değildir.

Diğer taraftan, halihazırda ticari ürünler yerine biyoçar gibi üretilen bir karbon malzemenin modifiye edilerek veya edilmeden elektrot olarak kullanımına dayalı çalışmalar çok azdır. Katı atıkların değerlendirilmesine de olanak sağladığı için biyokütleden elde edilen biyoçar bu anlamda önemli bir potansiyele sahiptir.

Bilindiği gibi tarımsal atıklar dünyada oldukça büyük miktarda üretilmektedir. Bu atıklarla nasıl başa çıkılacağı doğrudan çevre ile bağlantılıdır. Atıkların biyoçara dönüşümü, çevresel sürdürülebilirlik için bir seçenektir. Genel olarak, tarımsal artıklar, yaygın bitki atıkları, gübre ve çamur atıkları biyoçar üretiminde hammadde olarak kullanılabilir. Farklı hammadde, farklı oranlarda elementlere sahiptir dolayısıyla farklı özellikler gösterir, bu yüzden farklı hammaddelerden üretilen biyoçar farklı performanslara sahip olacaktır. Biyoçar içindeki karbon içeriği ise elektrot üretimi bakımından önemli bir parametre olup yine hammaddeye göre farklılık gösterir.

Biyoçarlar, biyokütlenin oksijensiz ortamda pirolizi ile karbonca zengin ve gözenekli bir malzeme olarak üretilirler [13]. Piroliz dışında daha yüksek sıcaklıklarda oksijen/hava ortamında gazlaştırma ve su varlığında hidrotermal karbonizasyon işlemleri de diğer biyoçar üretim prosesleridir. Bazı çalışmalarda, biyoçarın yukarıda belirtilen üretim yöntemlerinin yanı sıra, flaş karbonizasyon ve kavurma (Torrefaksiyon) işlemlerinin de biyoçar üretiminde kullanıldığı rapor edilmiştir [14–17]. Ancak, biyoçar üretiminde en uygun yöntem piroliz yöntemidir [18]. Çünkü bu yöntemde ana ürün biyoçardır. Piroliz, karbon bazlı malzemelerin ısı uygulaması yoluyla kimyasal ayrışmasıdır. Gazlaştırma ve yanmanın da ilk adımı olan piroliz, oksijenin yokluğunda veya neredeyse yokluğunda meydana gelir. Bu nedenle, yalnızca yeterli oksijen mevcut olduğunda gerçekleşebilen yanma prosesinden farklıdır. Piroliz hızı sıcaklıkla artar. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan sıcaklıklar genellikle 430°C veya daha yüksektir, oysa daha küçük ölçekli işlemlerde sıcaklık çok daha düşük olabilir (350°C) [19]. Sıcaklık, ısıtma hızı, süre ve ortam koşulları dahil olmak üzere piroliz koşulları, biyoçarın fizikokimyasal özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tablo 1’de, daha önceki çalışmalardan alınan biyokütlerin bazı piroliz şartları ve elde edilen biyoçarın karbon içerikleri gösterilmiştir [20].

Tablo 1. Biyokütlenin piroliz şartları ve üretilen biyoçarın karbon içerikleri
(Pyrolysis conditions of biomass and carbon contents of produced biochar)

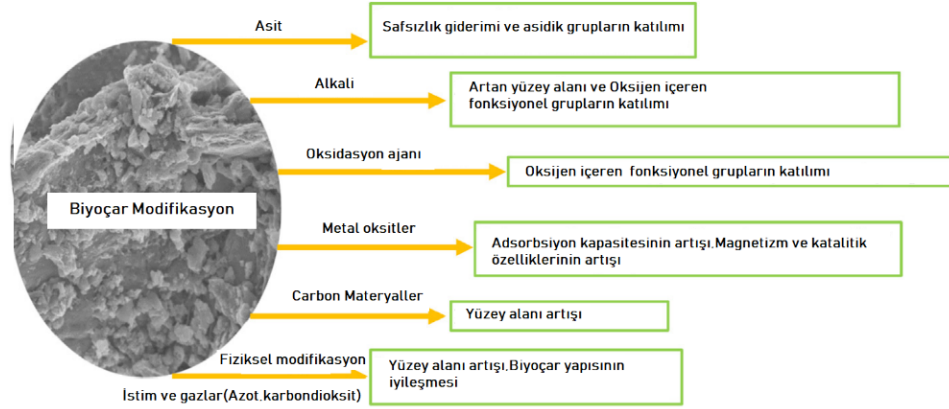
Biyokütle	Piroliz şartları	Karbon içeriği (%)
Bambu	500°C	83,6
Çam kozalağı	500°C; 2,5 sa	54,0
Çim	425°C; 1 dk.	67,8
Buğday kabuğu	500°C; 20 dk	50,5
Mısır	1200°C; 40 dk.	56,1
Çam talaşı	650°C	86,8
Şeker kamışı	350,450 ve 550°C	45,3-63,3
Pirinç samanı	250-450°C; 2, 4, 8sa	57,2-72,0
Kökner ağacı	623-823 °C; 0,5 sa	49,6-83,2
Pirinç samanı	100-700°C	23,5-50,8
Susam samanı	700°C; 4sa	72,6
Laminaria Japonica	700°C; 1 sa	26,7
Aspir tohumu	400-600°C;0,5 sa	68,2-73,8
İnek gübresi	400°C;1sa	60,2
Atık su çamuru	300-700°C	20,2-25,6
Çam ağacı	300-500°C; 2sa	63,9-90,5

Tablo1’de görüldüğü gibi, bu prosesler içinde, piroliz çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunan kolay kontrol edilebilir ve düşük maliyetli bir proses olması yanında yüksek karbon içeriğine sahip biyoçar ürünler vermesi sebebiyle en çok kullanılan biyoçar üretim yöntemidir.

Üretilen biyoçar ürünlerin çevresel amaç için modifiye edilmesinde genellikle kimyasal ve fiziksel modifikasyon prosesleri kullanılmaktadır. Bu modifikasyonlar ve modifikasyonların biyoçara yaptığı katkılar Şekil 2’de özetlenmiştir. Buna göre, kimyasal modifikasyonlar esas olarak asit modifikasyonu, alkali modifikasyonu, oksitleyici ajan modifikasyonu, metal tuzları -metal oksit modifikasyonu ve karbonlu materyal modifikasyonunu içerir. Fiziksel modifikasyon ise yüksek sıcaklıkta esas olarak, buhar ve gaz tahliyesini içermektedir. Fiziksel modifikasyonların proses maliyeti düşük ve uygulanması kimyasal modifikasyonlardan daha kolaydır.

Bu nedenle, çalışmada, EF prosesinde elektrot (katot) olarak kullanılması için, günümüzde önemli bir araştırma konusu olan, maliyeti ve üretimi kolay atık biyokütleden biyoçarın piroliz metodu ile üretilmesi ve fiziksel modifikasyon metodu ile yapısal özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, karışık mobilya atığı odun peletinden 350°C sıcaklıkta, inert ortamda (N₂ atmosferinde) biyoçar ürünler elde edilerek, bu ürünler, farklı gazlar altında (CO₂, N₂), yüksek sıcaklıklarda, farklı sürelerde termal olarak modifiye edilmişlerdir. Daha sonra biyoçar elektrotlar katot olarak kullanılırken, platin (Pt) tel anot olarak kullanılmış ve üretilen biyoçar elektrotların, Astrazon blue

boyasının çıkarımı (boya giderimi) ve hidrojen peroksit üretimi-akım verimliliğine etkisi incelenmiştir. Bu noktada kullanılan modifiye gazın cinsi, temas süresi ve modifikasyon sıcaklığının etki düzeyi gibi termal modifikasyonu etkileyen parametrelerin etkisi değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Biyoçarın çevresel amaçlı modifikasyon metotları ve biyoçara yaptığı katkılar (Environmental modification methods of biochar and its contributions to biochar)

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Materyal ve kimyasal maddeler (Materials and chemicals)

Biyoçar hammaddesi olarak mobilya atığından alınan biyokütle pelletleri toz haline getirilerek kullanılmıştır. Çalışmada Teflon çözeltisi (Sigma-Aldrich, ağırlıkça % 60 suda disperse özellikte) ve grafit (Merck, ekstra saf) katot katkı maddesi olarak, krom-nikel örgü tel (1cm²'deki delik sayısı: 120 ve 0,30 mesh) ise katot destek maddesi olarak kullanılmıştır. Yerel bir firmadan alınan platin (Pt) tel, EF sisteminde anot (counter elektrot), doymuş kalomel (SCE) elektrot (Gamry) ise referans elektrot olarak kullanılmıştır.

Model kirletici olarak seçilen Astrazon Blue (5GL, AB5, C₂₃H₂₄Cl₂N₂) boyası Merck firmasından alınarak, 50 mg/L konsantrasyonda sentetik atık su çözeltisi hazırlanmıştır. N₂, CO₂ biyoçar üretimi ve termal modifikasyonda kullanılırken O₂ gazı ise EF sisteminde oksijen kaynağı olarak kullanılmıştır. Kullanılan tüm gazlar yerel firmalardan % 99,9 saflıkta alınmıştır.

Buna ek olarak, sodyum sülfat (Na₂SO₄, Merck, susuz ≥ % 99,0-100,5) elektrolit olarak, demir sülfat (FeSO₄.7H₂O, Sigma-Aldrich, % 99,0) katalizör olarak, sodyum hidroksit (NaOH, Merck % 99,0), Potasyum iyodür (KI, Merck ≥ % 99,5) Amonyum molibdat tetrahidrat ((NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O, Merck ≥ % 99,0) ve Potasyum hidrojen ftalat (KHP, Merck ≥ % 99,5 %) H₂O₂ analizinde kullanılan kimyasallardır.

2.2. Biyoçar üretimi ve termal modifikasyonu (Biochar production and thermal modification)

Pelet halindeki biyokütle mekanik bir öğütücü ile toz haline getirilerek 36 g biyokütle kuvars tüp (38 mm x 800 mm) içerisine yerleştirilmiş ve sabit yataklı tüp fırında (Protherm PTF 12/40/250) piroliz edilmiştir. Ham biyoçar üretimi için, sabit yataklı fırında sıcaklık 12°C/dk hızla artırılarak 350°C'ye getirilmiştir ve bu sıcaklıkta biyokütle 4 saat piroliz edilmiştir. Kuvars tüp girişine bağlantısı yapılan debimetre ile sisteme verilen N₂ gazının debisi 150 mL/dk olarak ayarlanmıştır. Piroliz işlemi sonunda, kuvars tüpten ürünün alınması için sistemden N₂ gazı geçirilmeye devam edilmiş ve fırının oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Bu şartlarda üretilen biyoçar ürün çalışmada, N₂-350-4 (ham) biyoçar olarak adlandırılmıştır. Daha sonra, yapısal özelliklerinin iyileştirilmesi için, piroliz ortamı, uygulama sıcaklığı ve süresi, biyoçar modifikasyon parametreleri olarak seçilerek biyoçarın fiziksel (termal) modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, üretilen ham biyoçarlar, N₂ veya CO₂ gaz ortamında 500-700-900 °C sıcaklık ve 1-2-4 saat uygulama sürelerinde piroliz yöntemi ile termal olarak modifiye edilmiş ve toplamda 10 adet, üretim şartları ve yapısal özellikleri farklı olan modifiye biyoçar ürünler üretilmiştir. Üretilen biyoçarların adları ve bu biyoçarlara ait piroliz şartları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Üretilen biyoçar ürünler ve üretim şartları (Produced biochar products and production conditions)

No	Biyoçar türü	Biyoçar adı	Gaz	Sıcaklık (°C)	Süre (sa.)
0	Ham	N ₂ -350-4	N ₂	350	4
1	Modifiye	N ₂ -500-1	N ₂	500	1
2	Modifiye	N ₂ -500-2	N ₂	500	2
3	Modifiye	N ₂ -500-4	N ₂	500	4
4	Modifiye	N ₂ -700-1	N ₂	700	1
5	Modifiye	N ₂ -900-1	N ₂	900	1
6	Modifiye	CO ₂ -500-1	CO ₂	500	1
7	Modifiye	CO ₂ -500-2	CO ₂	500	2
8	Modifiye	CO ₂ -500-4	CO ₂	500	4
9	Modifiye	CO ₂ -700-1	CO ₂	700	1
10	Modifiye	CO ₂ -900-1	CO ₂	900	1

2.3. Biyoçar ürünlerin karakterizasyonu (Characterization of biochar products)

Üretilen biyoçar ürünlerin kimyasal yapısının aydınlatılması ve fonksiyonel gruplarının tanımlanması için ATR yöntemi (4000 cm⁻¹- 500 cm⁻¹) ile FT-IR analizi (Perkin Elmer, Spectrum 1000) yapıldı.

Yapısal karakterizasyonları ve yüzey morfolojileri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Hitachi model) kullanılarak gözlendi. Ayrıca SEM-EDS ile örnek içindeki C ve O elementlerinin yüzdeleri analiz edildi. Daha sonra daha yüksek doğruluk için elementel analiz ile yüksek sıcaklıkta (1000-1100°C) yakma yoluyla örnek içindeki CHN-S elementlerinin yüzdeleri bir elementel analiz cihazında (LECO marka CHNS 628 model) tayin edildi.

Faz yapıları X-ışını difraktometresi (XRD, Rigaku modeli, Cu Ka ile ($\lambda = 1,54059$)), 10–90° 2 θ aralığında 5°/dk tarama hızında radyasyon akışı ile karakterize edildi. Bu analizde volt 40 kV ve uygulanan akım 40 mA dir. Çalışmada ayrıca, elektrot kalitesini göstermesi açısından tüm fazlar için ortalama kristal boyutu, XRD desenlerinden, Eşitlik (1)'de verilen Scherrer denklemi kullanılarak hesaplandı [2,3], [21,22].

$$L = \frac{\alpha\lambda}{\beta\cos\theta} \quad (1)$$

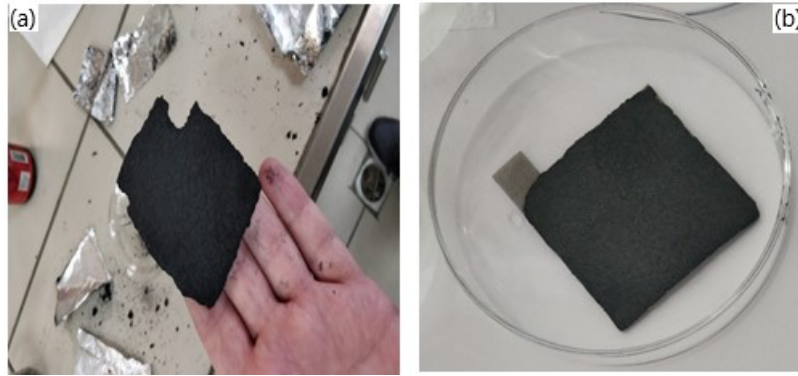
Eşitlik 1'de gösterilen L: kristal boyutu (Å), α : bir sabittir ve değeri 0,94'dür. β : radyan cinsinden (yüksek yoğunluklu tepe için elde edilen) yarı maksimumda tam genişliktir. λ : X-ışınlarının dalga boyudur (1,54059Å).

2.4. Biyoçar elektrotların üretimi (Production of biochar electrodes)

Elektrot üretimi için Tablo 2'de verilen ham ve modifiye biyoçar numuneleri toz haline getirilerek 90 mesh elekten geçirildi. Daha sonra, 1,0 g (% 50 oranında) alınan biyoçar numunesi, 0,2 g (% 10 oranında) grafit, 0,8 g (% 40 oranında) % 60'lık teflon çözeltisi (% 24 oranında saf teflon) ve 3 mL saf etanol ile karıştırıldı. Karışım çok bekletilmeden, 25 cm² alanında kesilmiş bir krom-nikel örgü tel üzerine sürülerek el yapımı, maksimum: 300 bar-350 °C'de çalışabilen bir hot-press'de 300 °C sıcaklıkta 90 bar basınçta 10 dakika süreyle basılarak, 25 cm² (5x5cm) alanında biyoçar elektrotlar üretildi.

Elektrot üretim sırasında %10 oranında (0,2 g) grafit eklenmesinin sebebi, elektrot üretim çalışmalarında, biyoçarın krom-nikel örgü tel üzerine sürüş kolaylığının ve elde edilen elektrotun stabilitesinin sağlanması içindir. Grafit kullanılmadan üretilen yani stabil olmayan ile en uygun şartlarda grafit kullanarak üretilen ve stabil olan 11 elektrottan biri örnek teşkil etmesi açısından Şekil 3(a) ve 3(b)'de sırasıyla gösterilmiştir.

Çalışmada, üretilen elektrotlar daha sonra 2 saat boyunca asetonda, 2 saat boyunca saf suda bekletilerek tüm safsızlıklarından giderilmesi sağlandı. Bu şekilde boya giderimi sırasında ortama karbon ve diğer bileşenlerin girişi engellendi. Temizleme işleminden sonra elektrotlar bir sterilizatörde (Elektromag M5040 P) 80 °C'de kurutulularak kullanılıncaya kadar ağzı kapaklı cam kaplarda saklandı.



Şekil 3. Stabil olmayan (a) ve stabil olan (b) elektrotlardan biri (CO₂-700-1)
(One of the unstable (a) and stable (b) electrodes (CO₂-700-1))

2.5. Elektro-Fenton sisteminin kurulumu ve deneysel prosedür (Electro-Fenton system setup and experimental procedure)

Tek bölmeli, hacmi 150 mL olan EF reaktörü pleksiglas'dan yapıldı. Daha sonra Şekil 4'de şematik çizimi verilen EF sisteminde, model boya çözeltisinden reaktöre 120 mL hacimde konuldu. EF reaktöründe; anot (counter elektrot) olarak Pt tel, katot (working elektrot) olarak biyoçar elektrotlar ve referans elektrot olarak ise SCE elektrot kullanıldı. Tüm EF çalışmalarında standart olarak, katot ile anot arasındaki mesafe 3 cm olarak ayarlandı [2,3,8].

Daha önceki ön çalışmalara göre, pH (3), katalizör türü ve konsantrasyonu (FeSO₄: 0,2mM), elektrolit türü ve konsantrasyonu (Na₂SO₄ :50 mM) ve boya konsantrasyonu (50 mg/L) gibi çözelti özellikleri reaktöre koyulmadan önce ayarlandı [2,3]. EF prosesi başlatılmadan 10 dakika önce başlamak üzere sisteme 4 L/sa debi ile saf oksijen beslendi ve reaktördeki çözelti bir manyetik karıştırıcı (Heidolph MR 3001 model) ile yaklaşık 300 rpm hızında karıştırıldı. Daha sonra uygulanacak potansiyel bir Potansiyostat (Gamry interface 1000) sayesinde 2 V değerine set edilerek, EF işlemi başlatıldı. Aynı prosedür H₂O₂ üretimi için boya olmadan ve katalizörsüz ortamda, 30 dakika süresince yapıldı. Reaktöre istenen potansiyel uygulanmaya başladıktan sonra boya giderimi ve H₂O₂ üretimi belirli zaman aralıklarında reaktörden örnekler alınarak UV-visible spektrofotometrede (Hach marka DR6000) ölçülerek izlendi. Ayrıca, H₂O₂ üretim araştırmaları için akım verimliliği (CE, current efficiency) Eşitlik (2) kullanılarak hesaplandı [2,3], [21,22]. Akım verimliliği yüksek olan biyoçar elektrotlar belirlenerek en uygun modifikasyon şartları belirlenmeye çalışıldı.

$$CE(\%) = \frac{z \cdot F \cdot C_{H_2O_2} \cdot V}{M_{H_2O_2} \cdot I \cdot t} \times 100 \quad (2)$$

Burada, C_{H₂O₂}: H₂O₂ konsantrasyonudur (mg/L), F: Faraday sabitidir (96,485 C/mol), z: oksijen indirgeme reaksiyonunda aktarılan elektron sayısıdır (EF sistemi için: 2e⁻), V: çözelti hacmi (0,12 L), M_{H₂O₂}: H₂O₂ 'nin molar kütlesi (34,01 g/mol), I: uygulanan akım (mA) ve t: EF işlem süresidir (0,5 sa).

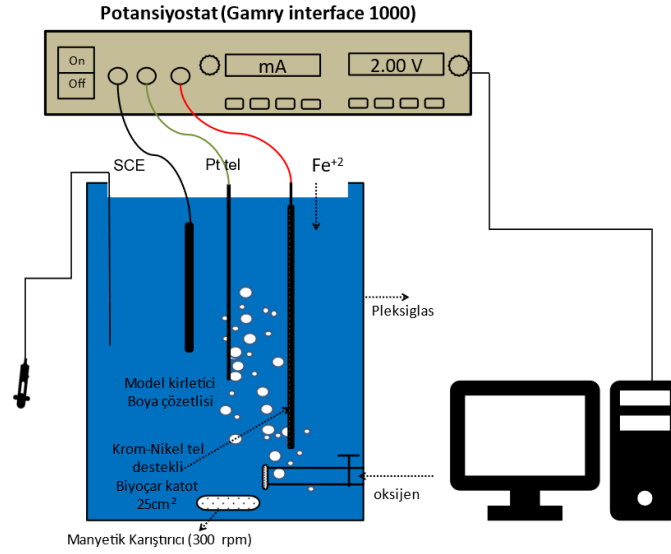
2.6. Analitik prosedürler (Analytical procedures)

Çözelti pH'ı bir pH metre (İnolab WTW, pH 720) ile başka bir işleme gerek duyulmadan oda sıcaklığında ölçüldü ve çözeltinin pH değeri 1 M H₂SO₄ çözeltisi kullanılarak ayarlandı.

Çalışmada, Astrazon blue boyasının saf suda 0-50 mg/L konsantrasyon aralığında çözeltileri hazırlanarak boyanın spesifik dalga boyu olan 576 nm dalga boyunda 0,9976 korelasyon katsayısı (R²) ile bir kalibrasyon eğrisi çizildi. Çalışmada 576 nm'de ölçülen absorpsiyon değerlerini konsantrasyon değerlerine (mg/L) dönüştürmek için, çizilen standart konsantrasyon-absorpsiyon kalibrasyon eğrisi kullanılarak Eşitlik (3)'de gösterilen Beer-Lambert yasasına göre dönüşüm sağlandı.

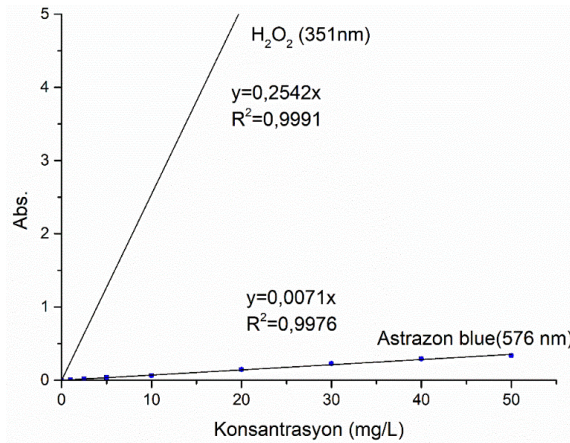
$$Abs = \epsilon \cdot l \cdot C \quad (3)$$

Burada, Abs: absorbans değeri, ε: molar absorpsiyon katsayısı (L/mol.cm), C: molar konsantrasyon (mol/L), l ise optik yol uzunluğu (1 cm) dur.



Şekil 4. EF sistemi (EF system)

Diğer taraftan, elektrotların hidrojen peroksit üretimi yine UV-vis spektrofotometre ile iyodometrik yöntem (ammonium molybdate tetrahydrate metodu) kullanılarak 351 nm dalga boyunda ölçüldü [23-24]. Bunun için 0-20 mg/L konsantrasyon aralığında H_2O_2 çözeltileri hazırlandı ve yine Eşitlik (3) kullanılarak 0,9991 korelasyon katsayısı (R^2) ile kalibrasyon eğrisi çizildi. Astrazon blue ve H_2O_2 konsantrasyonuna ait kalibrasyon eğrileri Şekil 5'de spesifik dalga boyları ile birlikte gösterilmiştir.

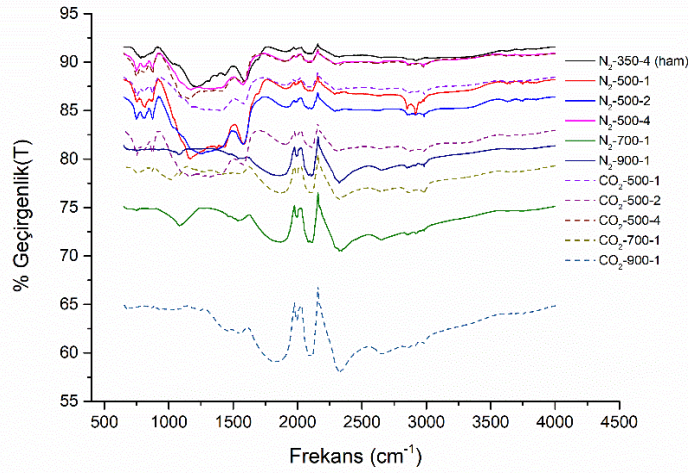
Şekil 5. Astrazon blue ve H_2O_2 'in kalibrasyonu eğrileri (Calibration curves of Astrazon blue and H_2O_2)

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

3.1. Biyoçar ürünlerin karakterizasyon sonuçları (Characterization results of biochar products)

Şekil 6'da gösterilen biyoçar ürünlerin FT-IR spektrumdaki 2900-3000 cm^{-1} bantları C-H gerilimine aittir. 2000-2329 cm^{-1} 'deki pikler, O=C=O ve karbon üçlü bağ gerilimi ile ilgilidir. 1800-1900 cm^{-1} 'deki tepe noktası, C-H bağının germe titreşimidir. 1500-1600 cm^{-1} civarındaki tepe noktaları, C=C aromatik geriliminin titreşim frekansından kaynaklanmaktadır. 1000 cm^{-1} civarındaki tepe noktası C-O bağ titreşimi ve C-N gerilmesinden kaynaklanırken, 750-790 cm^{-1} bölgesindeki tepe noktaları halkalı yapıları gösterir. Bu verilere göre, farklı sıcaklıklarda ve gaz varlığında modifiye edilen biyoçar ürünlerin spektrumları benzer desenler sergilemektedir, ancak işlem sıcaklığı arttıkça ve gaz değişimine göre bantlarının yoğunluğu da değişmektedir. Özellikle, 2000-2500 cm^{-1} titreşimlerinde gösterilen O=C=O ve karbon üçlü bağ gerilimlerine ait piklerin yoğunluğu, gaz değişimi ve sıcaklıktan daha çok etkilenmiştir. Benzer şekilde, 2900-3000 cm^{-1} 'deki C-H gerilimine ait piklerin yoğunluğu ise sıcaklık arttıkça yok olmuştur. Yine yapılarındaki C ve O oranlarındaki değişime bağlı olarak 1500-1600 cm^{-1} civarındaki C=C aromatik geriliminin titreşim frekansı, 1000 cm^{-1} civarındaki C-O bağ titreşimi ve C-N gerilmesi de modifikasyonun süresine ve gaz türüne göre farklılık göstermiştir. Bu durum Elementel analiz ve SEM-EDS sonuçlarındaki elementlerin yüzdelerinden de anlaşılmaktadır. Ancak,

biyoçar ürünlerde ana bileşenler karbon (C) ve oksijen (O) olduğundan C-O, O=C=O ve C=C bağlarına ait bantların yoğunluğu ve şiddetindeki değişimin daha fazla olacağı aşikârdır.



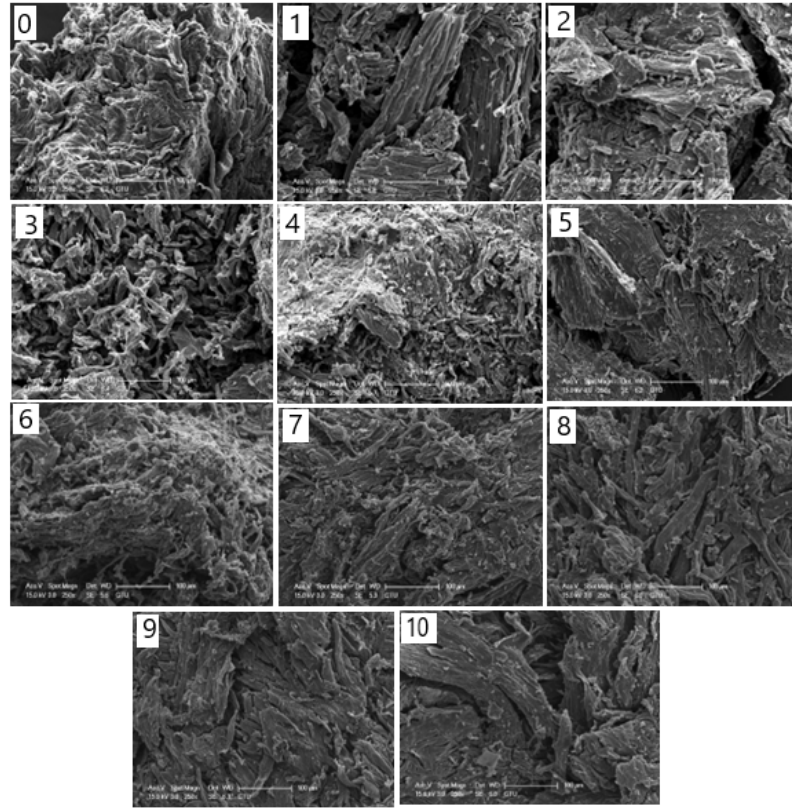
Şekil 6. Biyoçar ürünlerin FT-IR spektrumları (FT-IR spectra of biochar products)

Tablo 3. Biyoçar ürünlerin SEM-EDS ve elementel analiz sonuçları (SEM-EDS and elemental analysis results of biochar products)

No	Biyoçar adı	SEM-EDS analizi		Elementel analiz				
		% C (atomik)	% O (atomik)	Kütle (mg)	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)
0	N ₂ -350-4	81,91	18,09	1,46	3,05	73,68	3,95	19,33
1	N ₂ -500-1	88,91	11,09	1,14	3,42	79,86	3,29	13,44
2	N ₂ -500-2	88,56	11,44	1,42	2,95	78,84	3,03	15,19
3	N ₂ -500-4	88,90	11,10	1,31	2,64	80,97	2,88	13,50
4	N ₂ -700-1	88,16	11,84	1,62	2,15	83,28	1,63	12,94
5	N ₂ -900-1	91,20	8,80	1,78	1,94	84,16	1,17	12,72
6	CO ₂ -500-1	89,00	11,00	1,53	2,72	79,58	2,91	14,79
7	CO ₂ -500-2	89,48	10,52	1,84	2,79	81,83	2,91	12,48
8	CO ₂ -500-4	89,30	10,70	1,46	3,11	80,25	2,78	13,86
9	CO ₂ -700-1	88,95	11,05	1,30	1,86	82,59	1,76	13,79
10	CO ₂ -900-1	87,35	12,65	1,56	1,01	81,40	1,17	16,42

Biyoçar üründeki % C miktarının yüksek olması EF sisteminde elektrot üretimi için oldukça önemlidir. Bu açıdan SEM-EDS ve Elementel analizden alınan sonuçlar Tablo 3'de özetlenmiştir. Tablo 3'de verilen ham ve modifiye biyoçar ürünlerin % C değerleri incelendiğinde, modifikasyon işleminin karbonun % miktarını (% C) arttırdığı gözlenmiştir. % S tüm ürünlerde sıfır olduğu için Tablo 3'de gösterilmemiştir. Tablo 3'deki SEM-EDS sonuçları incelendiğinde elementel analiz sonuçlarına göre % C değerinde %10'luk bir hata payı olduğu gözlenmektedir. Diğer taraftan, Şekil 7'de gösterilen SEM görüntülerinde, modifikasyon yapılmış ürünlerin yüzey morfolojisi ile modifikasyonu yapılmamış ham ürünün yüzey morfolojisi arasında farklar olduğunu gözlenmiştir. Modifikasyon sıcaklığı değiştikçe bu fark daha belirginleşmiştir.

XRD sonuçlarına göre ise, modifiye biyoçar ürünler ve N₂-350-4 (ham) biyoçar ürün için, karbon pik ve ortalama kristal boyut değerleri (L, Å) Tablo 4'de verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde, ham biyoçar ürüne göre, kristal boyutundaki artışın en yüksek olduğu ürün CO₂-700-1 ürünü olup bu üründe kristal boyutundaki artış % 26,5 oranında iken, N₂ gazında, aynı sıcaklıkta modifiye edilen N₂-700-1 ürününde ise bu artış %17,24 oranındadır. Bu sonuçlar, kristal boyutundaki artışın modifikasyonda gazın cinsine, süreye ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklikler gösterdiğini kanıtlamıştır. Bu durum, bir modifikasyon işleminde uygun bir sıcaklık, gaz ve sürenin seçilmesinin ürünlerin etkin özelliklerin elde edilmesinde ne kadar önemli olduğunu göstermiştir.



Şekil 7. Biyoçar ürünlerin SEM görüntüleri (SEM images of biochar products)

Tablo 4. Biyoçar ürünlerin XRD verilerinden hesaplanan karbon pik ve ortalama kristal boyutları
(Carbon peak and average crystal sizes calculated from XRD data of biochar products)

No	Biyoçar adı	Karbon pik 2θ (deg.)	β (rad)	L(Å)
0	N ₂ -350-4	25,52	0,254	5,8
1	N ₂ -500-1	25,14	0,202	7,2
2	N ₂ -500-2	25,38	0,191	7,7
3	N ₂ -500-4	25,02	0,191	7,6
4	N ₂ -700-1	25,14	0,203	7,1
5	N ₂ -900-1	25,08	0,202	7,2
6	CO ₂ -500-1	25,22	0,194	7,5
7	CO ₂ -500-2	25,02	0,193	7,5
8	CO ₂ -500-4	25,00	0,193	7,5
9	CO ₂ -700-1	25,00	0,184	7,9
10	CO ₂ -900-1	25,02	0,196	7,4

Tablo 5. Biyoçar elektrotların H₂O₂ üretim performansları ve akım verimlilikleri
(H₂O₂ production performances and current efficiencies of biochar electrodes)

No	Elektrot adı	I (mA)	C _{H₂O₂} (mg/L)	CE (%)
0	N ₂ -350-4	100,7	24,04	24,38
1	N ₂ -500-1	102,4	22,57	22,51
2	N ₂ -500-2	113,4	22,38	20,16
3	N ₂ -500-4	127,0	24,39	19,61
4	N ₂ -700-1	141,3	20,31	14,68
5	N ₂ -900-1	294,4	42,71	14,82
6	CO ₂ -500-1	153,6	3,90	2,59
7	CO ₂ -500-2	150,0	36,73	25,01
8	CO ₂ -500-4	176,0	40,22	23,34
9	CO ₂ -700-1	108,8	44,02	41,33
10	CO ₂ -900-1	190,4	7,44	3,87

3.3. Biyoçar elektrotların astrazon blue giderim performansları (Astrazon blue removal performances of biochar electrodes)

H₂O₂ üretiminde elde edilen sonuçlar her ne kadar biyoçar elektrotların EF sistemindeki performansını gösterse de boya (Astrazon blue) gideriminde elektrotların davranışı ve verimliliğinin test edilmesi de

önemli bir husustur. Bu hususun aydınlatılabilmesi için, ikinci aşama olarak, 11 biyoçar elektrot EF sisteminde boya giderim çalışmalarında kullanılmıştır. Belirlenen deneysel şartlarda (pH: 3, Na₂SO₄: 50 mM, FeSO₄: 0,2 mM, boya kons.:50 mg/L, potansiyel: 2 V, karıştırma: 300 rpm, O₂ debi: 4 L/sa) 30 dakika EF süresinde boya giderim verimleri biyoçar elektrotların akım değerleri ile birlikte Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Biyoçar elektrotların boya giderim verimleri (Dye removal yields of biochar electrodes)

No	Elektrot adı	I (mA)	% Boya giderimi
0	N ₂ -350-4	177,1	22,07
1	N ₂ -500-1	98,99	41,45
2	N ₂ -500-2	89,94	32,85
3	N ₂ -500-4	75,62	41,04
4	N ₂ -700-1	147,50	55,28
5	N ₂ -900-1	105,30	35,52
6	CO ₂ -500-1	107,00	25,08
7	CO ₂ -500-2	91,90	54,13
8	CO ₂ -500-4	91,58	62,38
9	CO ₂ -700-1	170,20	66,55
10	CO ₂ -900-1	154,70	53,80

Tablo 6'da görüldüğü gibi üretilen elektrotların boya giderim verimliliği, H₂O₂ üretimi miktarı ile paralellik göstermiş ve yine 1 saat boyunca CO₂ gazı ile modifiye edilen elektrot (CO₂-700-1) en yüksek boya giderim verimi sergilemiştir. Bu değer ham elektrotun (N₂-350-4) sergilediği boya giderim veriminden 3,02 kat daha fazladır. Aynı şekilde, N₂ ile gazı aynı şartlarda modifiye edilen N₂-700-1 elektrotunun boya giderim verimi ise ham elektrottan 2,5 kat daha fazla olduğu bulunmuştur.

3.4. EF sisteminin enerji ve maliyet analizi (Energy and cost analysis of the EF system)

Çalışmada, Tablo 5 ve 6'ya göre 30 dakika EF işlem süresinde boya giderimi ve H₂O₂ üretimi açısından en etkin olan CO₂-700-1 elektrotu, aynı şartlarda ancak N₂ gazı ile modifiye edilen N₂-700-1 elektrotu, ham biyoçardan üretilen elektrot (N₂-350-4) ile boya giderimi ve H₂O₂ üretimi açısından daha az etkin olan diğer biyoçar elektrotlar, % 100 boya giderimi halinde tüketilen elektrik enerjisi ve arıtım maliyeti açısından değerlendirilmiştir. Daha sonra bulunan sonuçlar elektrotların boya giderim etkinliklerine göre Tablo 7'de sıralanmıştır. Tablo 7'de verilen değerlere göre, CO₂-700-1 elektrotu için bulunan arıtım maliyeti, ham elektroda göre % 68,2 daha düşükken, N₂-700-1 elektrotu için bu değer % 66,8'dir. Tablo 7'ye göre, diğer elektrotlardan bazılarının elektrik enerji tüketimi ve arıtım maliyeti düşük olsa bile bu elektrotlar etkin bir peroksit üretimi ve boya giderimi sağlamamıştır.

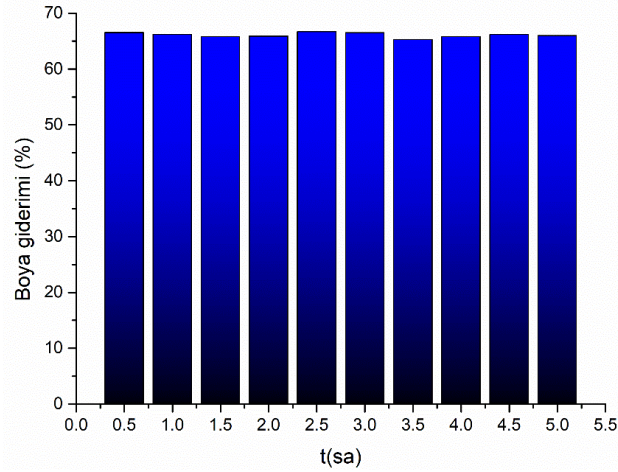
3.5. En etkin elektrotun kullanım ömrü (Lifecycle of the most efficient electrode)

Bu çalışmada, en etkin elektrotun (CO₂-700-1) 30 dakikalık döngülerle 5 saate kadar kullanım ömrü test edilmiştir. Elektrotun ilk 30 dakikadaki % 66,55 boya veriminin 5 saat sonra % 66,0 olduğu gözlenmiştir. (Şekil 8). Bu sonuçlara göre, 10 döngü sonunda elektrotun boya giderme veriminde önemli azalma olmadığı söylenebilir. Çalışmada, her döngüden sonra elektrot 10 dakika 1M HCl içerisinde tutularak rejenere edilmiş ve 1 saat ultra saf suda tutularak tekrar kullanılmıştır.

Tablo 7. EF proses koşullarında biyoçar elektrotlarının enerji verimliliği ve maliyet analizi (Energy efficiency and cost analysis of biochar electrodes under EF process conditions)

Etkinlik sırası	Elektrot türü	I (mA)	Elektrik enerjisi tüketimi (kWh/m ³)	Arıtım maliyeti* (\$/m ³)
1	CO ₂ -700-1	170,2	2,13	0,13
2	CO ₂ -500-4	91,6	1,22	0,08
3	N ₂ -700-1	147,5	2,22	0,14
4	CO ₂ -500-2	91,9	1,41	0,09
5	CO ₂ -900-1	154,7	2,40	0,15
6	N ₂ -500-1	98,9	1,99	0,12
7	N ₂ -500-4	75,6	1,54	0,09
8	N ₂ -900-1	105,3	2,47	0,15
9	N ₂ -500-2	89,9	2,28	0,14
10	CO ₂ -500-1	107,0	3,55	0,22
11	N ₂ -350-4 (Ham)	177,1	6,70	0,41

* Arıtım maliyeti 01 Haziran 2022 tarihli Türkiye piyasası dikkate alınarak hesaplanmıştır. 1kWh=0,06\$ (The treatment cost has been calculated considering the Turkish market dated 01 June 2022. 1kWh=0.06\$)



Şekil 8. En etkin elektrotun kullanım ömrü
(lifecyle of the most effective electrode)

4. Sonuçlar (Conclusions)

Çalışmada atık biyokütleden piroliz yöntemi ile elde edilen ham biyoçar ürün daha sonra farklı şartlarında modifiye edilerek, modifikasyon gazı, sıcaklık, süre gibi modifikasyon şartlarının boya giderim ve H₂O₂ üretim verimine etkisi incelenmiştir. Bunun için üretilen biyoçar elektrotlar EF sisteminde katot olarak kullanılmıştır. Modifikasyonla H₂O₂ üretim veriminde ham biyoçara göre maksimum 1,7 kat artış sağlanırken, boya giderim veriminde ham biyoçar elektrota göre 1,13 – 3,02 kat arasında artış sağlanmıştır. Bu yüzden, biyoçar üretiminden sonra CO₂ ve N₂ gazları altında termal modifikasyonun arıtımda oldukça önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Biyokütle türüne göre etkin modifikasyon şartları değişebilmektedir. Ancak bu çalışmada karışık mobilya atığı olan biyokütleden üretilen biyoçar için 700 °C sıcaklık ve CO₂ gazı 1 saat sürede etkin bir termal modifikasyon sağlamıştır. Boya giderim verimi bu modifikasyonla 3,02 kat artarken elektrik enerjisi tüketimi yaklaşık 3 kat azalmış ve arıtım maliyeti ise % 68,2 oranında düşmüştür. Buna ek olarak, seçilen en etkin elektrot (CO₂-700-1) kullanılarak yarım saatlik döngüler ile 10 döngü sonunda boya giderme verimliliğinde herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, elektrotun etkin ömrü sayesinde endüstriyel uygulamalarda da kullanılabileceğini göstermiştir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışma 120Y060 nolu proje olarak, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) sağladığı maddi destek ile gerçekleştirilmiştir. Projeye verdiği maddi destek için TÜBİTAK'a, teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] P.V. Nidheesh, R. Gandhimathi, S.T. Ramesh, "Degradation of dyes from aqueous solution by Fenton processes: a review," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 20, pp. 2099–2132, 2013. doi:10.1007/S11356-012-1385-Z
- [2] B.T. Ergan, M. Soybelli and E. Gengec, "Impact of thermal modification of carbon felt on the performance of oxygen reduction reaction and mineralisation of dye in on-line electro fenton system," *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* (in press), pp. 1-17, 2021. doi:10.1080/03067319.2021.2015341
- [3] B.T. Ergan and E. Gengec, "Dye degradation and kinetics of online Electro-Fenton system with thermally activated carbon fiber cathodes," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, pp. 104217, 2020. doi: 10.1016/j.jece.2020.104217
- [4] F. Deng, H. Olvera-Vargas, O. Garcia-Rodriguez, Y. Zhu, J. Jiang, S. Qiu and J. Yang, "Waste-wood-derived biochar cathode and its application in electro-Fenton for sulfathiazole treatment at alkaline pH with pyrophosphate electrolyte," *J. Hazard. Mater.* vol. 377, pp. 249–258, 2019. doi:10.1016/J.JHAZMAT.2019.05.077

- [5] C. T. Wang, W. L. Chou, M. H. Chung and Y. M. Kuo, "COD removal from real dyeing wastewater by electro-Fenton technology using an activated carbon fiber cathode," *Desalination*, vol. 253, pp. 129–134, 2010. doi:10.1016/j.desal.2009.11.020
- [6] H. Lei, H. Li, Z. Li, Z. Li, K. Chen, X. Zhang and H. Wang, "Electro-Fenton degradation of cationic red X-GRL using an activated carbon fiber cathode," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 88, pp. 431–438, 2010. doi:10.1016/j.psep.2010.06.005
- [7] G. Divyapriya, P. V. Nidheesh, "Importance of Graphene in the Electro-Fenton Process," *ACS Omega*, vol. 5, pp. 4725–4732, 2020. doi:10.1021/acsomega.9b04201
- [8] O. Karatas, N.A. Gençec, E. Gençec, A. Khataee and M. Kobya, "High-performance carbon black electrode for oxygen reduction reaction and oxidation of atrazine by electro-Fenton process," *Chemosphere*, vol. 287, pp. 132370, 2022. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.132370
- [9] Y. Gong, J. Li, Y. Zhang, M. Zhang, X. Tian and A. Wang, "Partial degradation of levofloxacin for biodegradability improvement by electro-Fenton process using an activated carbon fiber felt cathode," *J. Hazard. Mater.*, vol. 304, pp. 320–328, 2016. doi:10.1016/j.jhazmat.2015.10.064
- [10] H. Lan, W. He, A. Wang, R. Liu, H. Liu, J. Qu and C.P. Huang, "An activated carbon fiber cathode for the degradation of glyphosate in aqueous solutions by the Electro-Fenton mode: Optimal operational conditions and the deposition of iron on cathode on electrode reusability," *Water Res.* vol. 105, pp. 575–582, 2016. doi:10.1016/j.watres.2016.09.036
- [11] A. Wang, J. Qu, J. Ru, H. Liu and J. Ge, "Mineralization of an azo dye Acid Red 14 by electro-Fenton's reagent using an activated carbon fiber cathode," *Dye. Pigment*, vol. 65, pp. 227–233, 2005. doi:10.1016/j.dyepig.2004.07.019
- [12] G. Xia, Y. Lu and H. Xu, "Electrogeneration of hydrogen peroxide for electro-Fenton via oxygen reduction using polyacrylonitrile-based carbon fiber brush cathode," *Electrochim. Acta.*, vol. 158, pp. 390–396, 2015. doi:10.1016/j.electacta.2015.01.102
- [13] B. Wang and J. Fang, "Critical reviews in environmental science and technology recent advances in engineered biochar productions and applications," *Recent advances in engineered biochar productions and applications*, vol. 47, pp. 2158–2207, 2018. doi:10.1080/10643389.2017.1418580
- [14] V. Benavente and A. Fullana, "Torrefaction of olive mill waste," *Biomass and Bioenergy*. vol. 73, pp. 186–194, 2015. doi:10.1016/j.biombioe.2014.12.020
- [15] W. H. Chen, Y. Q. Zhuang, S. H. Liu, T. T. Juang, and C. M. Tsai, "Product characteristics from the torrefaction of oil palm fiber pellets in inert and oxidative atmospheres," *Bioresour. Technol.*, vol. 199, pp. 367–374, 2016. doi:10.1016/j.biortech.2015.08.066
- [16] T. Nunoura, S. R. Wade, J. P. Bourke and M. J. Antal, "Studies of the flash carbonization process. 1. propagation of the flaming pyrolysis reaction and performance of a catalytic afterburner," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 45, pp. 585–599, 2006. doi:10.1021/IE050854Y
- [17] S. R. Wade, T. Nunoura, M. J. Antal, "Studies of the flash carbonization process. 2. violent ignition behavior of pressurized packed beds of biomass": A factorial study", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 45, pp. 3512–3519, 2006. doi:10.1021/IE051374
- [18] J. S. Cha, S. H. Park, S.C. Jung, C. Ryu, J. K. Jeon, M. C. Shin, and Y. K. Park, "Production and utilization of biochar: A review," *J. Ind. Eng. Chem.* vol. 40, pp. 1–15, 2016. doi:10.1016/j.jiec.2016.06.002
- [19] V. Hansen, D. Müller-Stöver, J. Ahrenfeldt, J. K. Holm, U. B. Henriksen and H. Hauggaard-Nielsen, "Gasification biochar as a valuable by-product for carbon sequestration and soil amendment," *Biomass and Bioenergy*, vol. 72, pp. 300–308, 2015. doi:10.1016/j.biombioe.2014.10.013
- [20] J. Wang and S. Wang, "Preparation, modification and environmental application of biochar: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 227, pp. 1002–1022, 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.282
- [21] T. X. H. Le, C. Charmette, M. Bechelany and M. Cretin, "Facile Preparation of Porous Carbon Cathode to Eliminate Paracetamol in Aqueous Medium Using Electro-Fenton System," *Electrochim. Acta.* vol. 188, pp. 378–384, 2016. doi:10.1016/j.electacta.2015.12.005
- [22] I. Kashif, A. A. Soliman, E. M. Sakr and A. Ratep, "XRD and FTIR studies the effect of heat treatment and doping the transition metal oxide on LiNbO3 and LiNb3O8 nano-crystallite phases in lithium borate glass system," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 113, pp. 15–21, 2013. doi:10.1016/j.saa.2013.04.084
- [23] A. Özcan, Y. Şahin, A. Savaş Koparal and M. A. Oturan, "Carbon sponge as a new cathode material for the electro-Fenton process: Comparison with carbon felt cathode and application to degradation of synthetic dye basic blue 3 in aqueous medium," *J. Electroanal. Chem.* vol. 616, pp. 71–78, 2008. doi:10.1016/j.jelechem.2008.01.002.
- [24] Standard Operating Procedure GSI/SOP/BS/RA/C/7 (2009). "Procedure For Analyzing Hydrogen Peroxide Concentrations in Water"



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

A Parametric Investigation on Various Compliant Inertial Amplification Mechanisms for a Periodic Vibration Isolator Design

Enes Er^a, Erol Türkeş^b, Osman Yüksel^{*c}

Submitted: 28.07.2022 Revised: 25.10.2022 Accepted: 03.12.2022 doi:10.30855/gmbd.0705039

ABSTRACT

Keywords: Parametric study, compliant mechanism, vibration isolation, inertial amplification, periodic structure

^a Kırklareli University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
39010 - Kırklareli, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0429-4467
e mail: eneser9398@gmail.com

^b Kırklareli University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
39010 - Kırklareli, Türkiye
Orcid: 0000-0002-9601-7119
e mail: erol.turkes@klu.edu.tr

^{c*} Kırklareli University,
Faculty of Engineering,
Dept. Of Mechanical Engineering,
39010 - Kırklareli, Türkiye
Orcid: 0000-0001-9492-1756
e mail: osmanyuksel@klu.edu.tr

*Corresponding author:
osmanyuksel@klu.edu.tr

In this study, a vibration isolator is designed as a periodic structure, which is constructed with embedded inertial amplification mechanisms. At first, various compliant inertial amplification mechanism configurations are proposed. Among them, the one with the widest vibration isolation frequency band is selected via conducted parametric studies. Then, the determined mechanism is utilized as the unit cell (i.e., the repetitive building block) of the periodic structure. Finally, the displacement transmissibility (i.e., Frequency Response Function (FRF)) plots are presented to demonstrate the vibration isolation performance of the designed periodic structure. According to the numerical results, the selected unit cell mechanism provides more than 25 % vibration isolation between 190-360 Hz frequency values. On the other hand, the periodic structure formed with linearly incorporating three unit cell mechanisms provides more than 80 % vibration isolation for the same frequency range (i.e., 190-360 Hz). As a conclusion, if the number of unit cells used in the periodic structure is increased further, higher vibration isolation levels will be achieved for 190-360 Hz frequency range.

Çeşitli Esnek Atalet Artırımı Mekanizmalarının Periyodik Titreşim Yalıtıcısı Tasarımına Yönelik Parametrik İncelemesi

ÖZ

Bu çalışmada, iç içe gömülmüş atalet artırımı mekanizmalarıyla oluşturulmuş bir periyodik yapı, titreşim yalıtıcısı olarak tasarlanmıştır. İlk olarak, çeşitli esnek atalet artırımı mekanizma konfigürasyonları önerilmiştir. Yapılan parametrik çalışmalar neticesinde, bu mekanizmalardan en geniş titreşim yalıtımı frekans aralığına sahip olanı belirlenmiştir. Ardından, bu seçilen tasarım, periyodik yapının birim hücresi (periyodik yapıda tekrar eden yapı bloğu) olarak kullanılmıştır. Son olarak, periyodik yapının titreşim yalıtımı performansını göstermek için deplasman iletkenliği (frekans cevap fonksiyonu) grafikleri sunulmuştur. Sayısal çalışmaların sonuçlarına göre, seçilen birim hücre mekanizması 190-360 Hz frekans aralığında % 25'ten fazla titreşim yalıtımı sağlamaktadır. Öte yandan, üç adet birim hücre mekanizmasının doğrusal bir biçimde birleştirilmesiyle oluşturulan periyodik yapı, aynı frekans aralığında (190-360 Hz) % 80'den fazla titreşim yalıtımı sağlamaktadır. Sonuç olarak, periyodik yapıda kullanılan birim hücre sayısı daha da arttırılırsa, 190-360 Hz frekans aralığında daha yüksek titreşim yalıtım düzeylerine ulaşılabacaktır.

Anahtar Kelimeler: Parametrik çalışma, esnek bağlantılı mekanizma, titreşim yalıtımı, atalet artırımı, periyodik yapı

1. Introduction

Mechanical vibrations are defined as the movement of waves around a certain equilibrium point. The movement in here occurs in a certain amplitude and period. These movements can both occur as harmonic or randomly distributed movement. If there is no damping or isolation for these waves in the system, then the vibration levels affecting the system can exceed the vibration level of the source. For this reason, an isolator for a mechanical structure is needed to reduce the vibration level of a system. Mechanical isolators prevent incoming source vibrations to reach the system, hence protect it from destructive oscillations. [1-3]

The most known traditional vibration isolation system is a mass-spring system. In these isolators, mechanical vibrations can be shown with the energy transformations of a system. Potential energy transforms to kinetic energy and after that it transforms to potential energy again. Therefore, a vibrating system must have components which store potential and kinetic energy. Springs and other similar elastic components are used for storage of potential energy. Similarly, mass and other inertia components used in these systems are able to store kinetic energy. [4-6]

Beside traditional vibration isolation methods, in recent years, innovative periodic structures [7, 8] were created to prevent the propagation of elastic and acoustic waves from the source to the target. Inertial amplification [9, 10] induced elastic metamaterials are a type of the innovative periodic structures [11, 12] which can inhibit vibration propagation. Therefore, this type of periodic structures can be utilized as vibration isolators [13-17]. Moreover, with these periodic structures, effective vibration isolation can be achieved for low frequency regions by altering their design parameters such as their size [18-20], shape [19], topology [20, 21].

In the literature, there exist various studies that examine vibration isolation properties of periodic structures constructed with different lumped and compliant inertial amplification mechanisms. In Ref. [22], enhanced tuned mass damper type vibration isolation system was designed by using a lumped parameter inertial amplification mechanism. In Ref. [23], vibration isolation enhancement in periodic nonuniform beams was achieved by introducing lumped parameter inertial amplification mechanisms. In Ref. [24], a amplification vibration isolator with periodic composite sandwich beams with lumped parameter inertial mechanisms was designed. In Ref. [25], vibration transmission reduction was attained in an elastic rod for a certain frequency range by periodically attaching lumped parameter inertial amplification mechanisms. The studies mentioned so far are all lumped parameter models. On the other hand, in the literature, there are numerous studies that investigates compliant mechanisms, as well. In Ref. [18], a size optimized periodic vibration isolator was designed with rectangular type compliant inertial amplification mechanisms. In Ref. [19], a two-dimensional periodic vibration isolator was designed with shape optimized compliant inertial amplification mechanisms of rectangular type. In Ref. [26], a size optimized three-dimensional periodic vibration isolator was designed with triangular type compliant inertial amplification mechanisms. In Ref. [27], a periodic vibration isolator was designed with composite triangular type compliant inertial amplification mechanisms. In Ref. [11], a one-dimensional periodic vibration isolator was designed via rectangular type compliant inertial amplification mechanisms with flexure hinge connections. In Ref. [21], a two-dimensional vibration isolator was designed via topologically optimized triangular type compliant inertial amplification mechanisms with flexure hinge connections and instant center of rotation. As seen in the literature review, rectangular or triangular compliant inertial amplification mechanism were studied extensively. However, a simple rhombus type compliant inertial amplification mechanism was not studied yet. To that end, in this article, a simple rhombus type compliant inertial amplification mechanism, which is to be used in the construction of a periodic vibration isolator, is analyzed in detail.

In this study, a parametric study is conducted on various compliant inertial amplification mechanisms. As a result of the parametric study, a mechanism with the highest vibration isolation frequency band width is determined. Then, this selected inertial amplification mechanism is utilized as the unit cell (i.e., the repetitive building block) to construct a periodic vibration isolator, which operates at low frequency region.

2. Model and Methodology

The main objective in this study is to create widest possible vibration isolation frequency band via

inertial amplification method. First, lumped parameter analytical model is discussed to briefly introduce the fundamentals of the method. Then, finite element models are introduced for the parametric studies, in which, three different unit cell configurations are proposed and analyzed. Finally, a periodic medium is created with a selected unit cell mechanism with the widest stop band (i.e., vibration isolation frequency band).

2.1. Analytic model

The lumped parameter inertial amplification mechanism model [7, 8, 18-21] is shown in Figure 1. In this model, k specifies as stiffness, m_a and m are the masses. The connection between m_a and m is rigid. Theta (θ) is the angle between the spring (k) and the rigid connection which combines mass m with mass m_a . The input displacement to the system is y and output displacement is x .

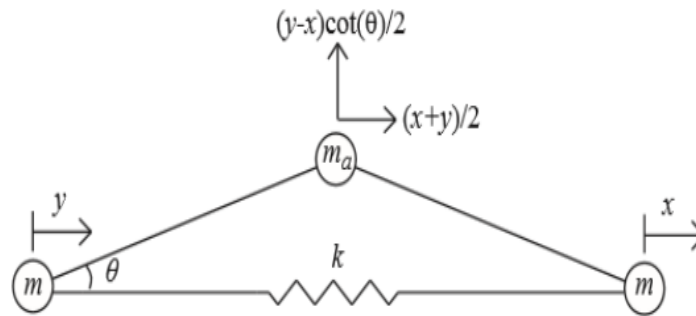


Figure 1. The lumped parameter inertial amplification mechanism model [7, 8, 18-21]

The equation of motion of the inertial amplification mechanism given in Figure 1 is found by the Lagrange method. The Lagrangian expression of the system is equal to the difference of kinetic and potential energies.

The Lagrangian is provided as:

$$L = KE - PE \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

The kinetic energy of the system is:

$$KE = \frac{m_a}{2} \left(\left(\frac{\dot{x} + \dot{y}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\dot{y} - \dot{x}}{2} \cot \theta \right)^2 \right) + \frac{m}{2} \dot{x}^2 + \frac{m}{2} \dot{y}^2 \quad (3)$$

The potential energy of the system is:

$$PE = \frac{1}{2} k (x - y)^2 \quad (4)$$

When Equations (3) and (4) are written in their place in Equation (2) and solved, the equation of motion of the system is found as:

$$(m_a (\cot^2 \theta + 1) + 4m) \ddot{x} + 4kx = m_a (\cot^2 \theta - 1) \ddot{y} + 4ky \quad (5)$$

In Equation (5), the left side of the differential equation is given with respect to the output x , hence its solution provides the resonance frequency. Similarly, since the right side of the equation is presented with respect to the input y , its solution defines the anti-resonance frequency. As a result, the resonance (ω_1) and the anti-resonance (ω_{z1}) frequencies are as follows:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{m + m_a (\cot^2 \theta + 1) / 4}} \quad (6)$$

$$\omega_{z1} = \sqrt{\frac{k}{m_a (\cot^2 \theta - 1) / 4}} \quad (7)$$

The beginning of the vibration isolation frequency range of the system is defined as [18, 19]:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{2\omega_1^2\omega_{z1}^2}{\omega_1^2 + \omega_{z1}^2}} \quad (8)$$

As can be seen from Equations (6), (7) and (8), when the angle θ decreases, the vibration isolation starting frequency is reduced, as well. Therefore, low frequency vibration isolation can be achieved.

2.2. Finite element modelling

The compliant inertial amplification mechanism model in this study is shown in Figure 2. The mechanism is formed by using rectangular blocks (enumerated as 1 and 3) and connecting beams (enumerated as 2). In other words, the structure is vertically and horizontally symmetric with respect to its (geometric) center. In Figure 2, l and t denote the length and thickness of the corresponding beams of the structure, respectively. The thin beams with length l_2 and thickness t_2 are compliant hinges which provide flexibility and stiffness to the mechanism. Whereas, large blocks of 1 and 3 perform only rigid body motion. Finite element model is created using three dimensional (3D) deformable linear quadrilateral shell elements. ABAQUS software is used for the finite element analysis. Element type selected for the study is S4, which is a fully integrated, general-purpose, finite-membrane-strain shell element. For the compliant inertial amplification mechanism model provided in Figure 2, the total number of finite elements used is 9600. Material type for the finite element model is isotropic.

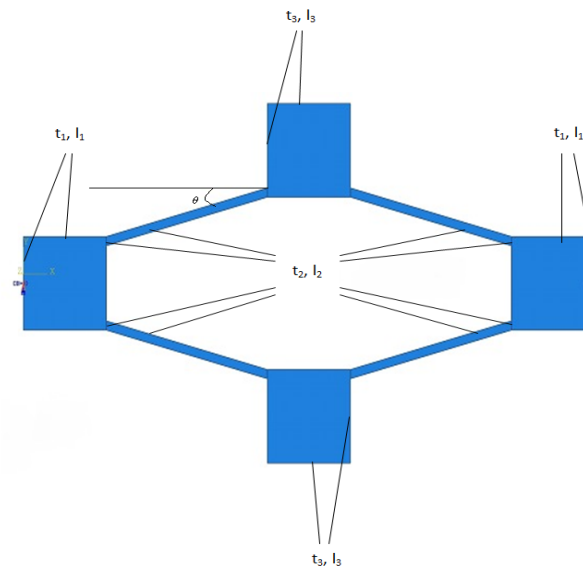


Figure 2. Model of compliant inertial amplification mechanism

2.3. Proposed compliant mechanisms

In this study, various types of compliant inertial amplification mechanisms which have different connection configurations and sizes are analyzed. The aim of the study is to determine how beam sizes and connection configurations affect the vibration isolation frequency range obtained via inertial amplification method. To that end, 2nd beam connection spots are altered and eventually three different compliant mechanism configurations are obtained as presented in Figures 3-5. Parametric studies are conducted on these three mechanisms with different beam sizes (i.e., with different length to thickness ratios for beams) and theta angles (i.e., the acute angle between the horizontal axis and the 2nd beam).

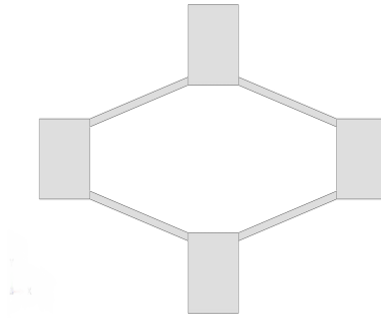


Figure 3. The first compliant mechanism configuration proposed (Mechanism A)

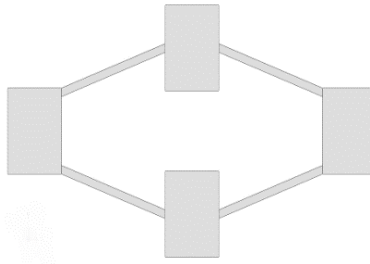


Figure 4. The second compliant mechanism configuration proposed (Mechanism B)

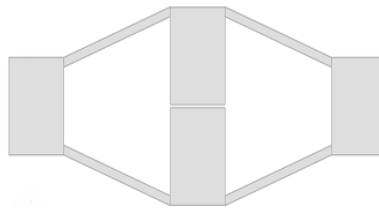


Figure 5. The third compliant mechanism configuration proposed (Mechanism C)

2.4. Parametric studies

The parametric studies are conducted on finite element models of the proposed mechanisms A, B and C which are provided in Figures 3-5. In parametric studies, the effect of alternating beam length to thickness ratios (l/t) and theta angles (θ) on vibration isolation frequency band (band gap) is investigated. In the literature [18-21], it has been shown that the ratio between the second and the first natural frequencies (f_2/f_1) directly demonstrates the band gap width. For this purpose, via modal analysis, natural frequencies of these mechanisms are obtained for various parameters and the ratio of the second natural frequency to the first natural frequency (f_2/f_1) values are tabulated.

First of all, a control structure is determined with parameters given as: $\theta = \pi / 12 = 15^\circ$, $l_1 = 5$ m, $t_1 = 5$ m, $l_2 = 10$ m, $t_2 = 0.5$ m, $l_3 = 5$ m, $t_3 = 5$ m.

An isotropic material is considered to be the construction material for the mechanisms. Hence, typical steel material properties are adopted for this purpose. To that end, material property values are selected as follows: modulus of elasticity, $E = 210$ GPa; density, $\rho = 7800$ kg/m³; Poisson's ratio, $\nu = 0.3$.

The goal in the parametric study is to determine the compliant mechanism structure with the highest f_2/f_1 ratio hence to achieve vibration isolation for maximum frequency band possible.

The variables considered in the parametric study are l_1/t_1 , l_2/t_2 , l_3/t_3 ratios and θ angle (see Figure 2). After, analyzing f_2/f_1 ratios of the proposed mechanisms (see in Figures 3-5) with various altering parameter values, the mechanisms that have the best f_2/f_1 ratios will be determined for each of the configuration. Ultimately, a last selection will be made among the best of the configurations, to decide the final unit cell mechanism that will be used in the periodic structure.

3. Results and Discussion

3.1. Parametric comparisons of vibration isolation frequency bands

The vibration isolation frequency band characteristics of proposed compliant mechanisms are analyzed and shown in this section. As it is mentioned before in the previous section, control structure parameters are determined and the effect of four variant parameters (θ , l_1/t_1 , l_2/t_2 and l_3/t_3) on vibration isolation frequency band width (f_2/f_1) are examined. After examination of trend plots, best parameters for each variant can be determined.

3.1.1. For the first mechanism (Mechanism A)

The first proposed mechanism is shown in Figure 3. To observe vibration isolation frequency band characteristics with altering parameters, trend plots are created (see Figure 6).

In Figure 6 trend plots of the first mechanism (Mechanism A) are presented. It can be seen that when the angle θ increases f_2/f_1 ratio is reduced. Similarly, when l_1/t_1 ratio increases f_2/f_1 ratio decreases. For l_2/t_2 , when the ratio increases, f_2/f_1 ratio increases as well. For the last parameter, as l_3/t_3 ratio increases, f_2/f_1 increases as well unless a peak is reached. However, after that critical value, f_2/f_1 is decreased with increasing l_3/t_3 ratio, as opposed to other parameters' trend plots.

3.1.2. For the second mechanism (Mechanism B)

The second proposed mechanism is shown in Figure 4. Besides, corresponding parameter trend plots are on vibration isolation frequency band characteristics of mechanism is given with Figure 7.

For the second mechanism, when θ angle increases f_2/f_1 ratio increases, as well. Different than the first plot, f_2/f_1 ratio decreases when l_1/t_1 ratio increases. In the third trend plot for second mechanism, f_2/f_1 ratio increases when l_2/t_2 ratio increases but the increase on f_2/f_1 ratio decelerating with the l_2/t_2 ratio increase. Same as the first mechanism, f_2/f_1 ratio increases until a critical value for l_3/t_3 ratio is reached and after that it starts to decrease.

3.1.3. For the third mechanism (Mechanism C)

The last proposed mechanism is given by Figure 5. Trend plots of the mechanism is given with the Figure 8.

For the third mechanism, when θ increases f_2/f_1 ratio increase, as well. For l_1/t_1 ratio, trend is different than the first and second mechanisms. Until a certain value of l_1/t_1 , f_2/f_1 ratio increase and after that it decreases. When l_2/t_2 ratio increases, f_2/f_1 ratio increases similar to the other mechanisms. For the last trend of third mechanism, f_2/f_1 ratio decrease when l_3/t_3 ratio increase unlike the first two mechanisms.

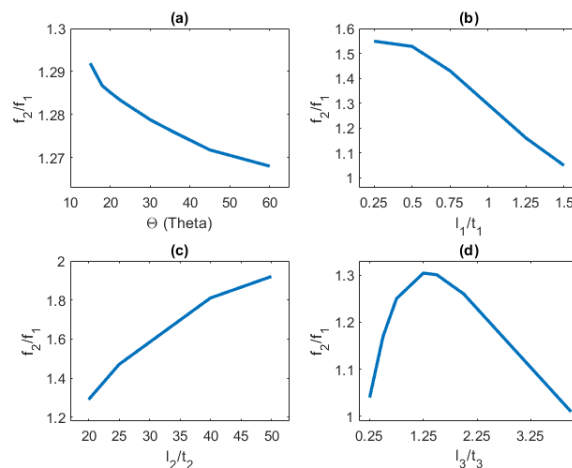


Figure 6. The effect of θ , l_1/t_1 , l_2/t_2 and l_3/t_3 parameters on f_2/f_1 ratio for the first mechanism (Mechanism A)

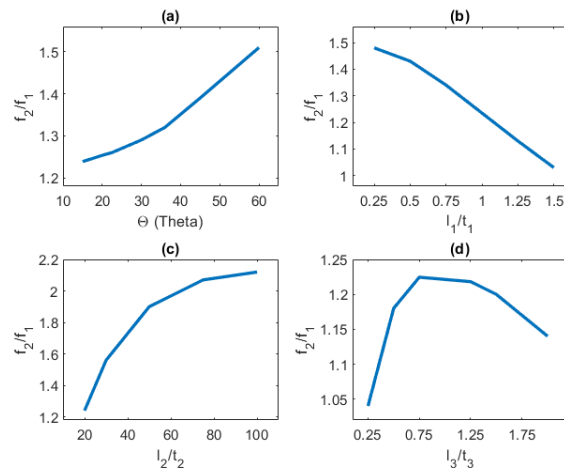


Figure 7. The effect of θ , l_1/t_1 , l_2/t_2 and l_3/t_3 parameters on f_2/f_1 ratio for the second mechanism (Mechanism B)

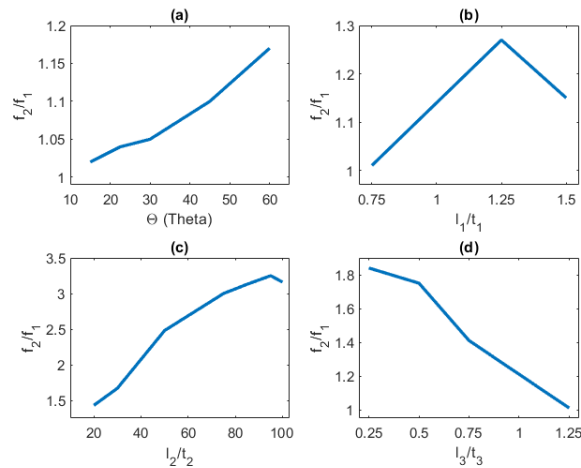


Figure 8. The effect of band gap characteristics theta, l_1/t_1 , l_2/t_2 and l_3/t_3 on f_2/f_1 ratio for the third mechanism (Mechanism C)

3.1.4. Discussion on vibration isolation frequency band properties

The results of parametric studies are given with Figures 6, 7 and 8 as trend plots. From here, the best results about vibration isolation frequency band characteristics for all three mechanisms can be found. Moreover, the best vibration isolation frequency band width results (i.e., f_2/f_1 ratios) for each of the proposed configurations (i.e., Mechanism A, B and C) are given with Table 1.

In l_2/t_2 trend plots, it can be seen that f_2/f_1 ratio increases continuously for all mechanism. The reason behind this behavior is when l_2/t_2 ratio increases stiffness of the mechanism decreases hence vibration isolation stop band starting mode (i.e., opening mode (f_1)) is shifted towards lower frequencies. This decrease in stiffness shifts the first mode more than the case observed in the second mode, as a result, f_2/f_1 ratio always increases with increasing l_2/t_2 ratio. However, considering manufacturability of the compliant mechanism beam length to thickness ratio (i.e., l_2/t_2) of mechanisms should be chosen as a realistic value.

In θ trend plots however, one can see a different behavior. For mechanism configuration A (see Figure 6), there is an inverse relationship between θ and f_2/f_1 ratio. Hence the widest possible vibration isolation frequency band is achieved for $\theta = 15^\circ$. It is coherent with the theory, because all of the inertial amplification mass is above the connection line (see Figure 1) and inertial amplification effect is already is at its maximum. On the other hand, for mechanism configurations B and C (see Figures 7 and 8), f_2/f_1 ratio increase with increasing θ . It is due to the fact that, as theory suggests, when inertially amplified mass amount m_a in Figure 1 increases with increasing θ , then inertial amplification effect also increases and vibration isolation frequency band starting frequency f_1 lowers. As a result, f_2/f_1 ratio increases.

The effects of l_1/t_1 and l_3/t_3 ratios on vibration isolation frequency band are similar for Mechanisms A and B as can be seen from Figures 6 and 7. However, the same behavior can not be observed for the Mechanism configuration C. This is an expected result since, Mechanism configuration C's inertial amplification effect is limited. The inertially amplified mass amount has a limit, since, the center of gravity of 3rd block segments almost coincide with the center of gravity of 1st blocks. Hence, Mechanism C's building blocks are almost linear for high l_3/t_3 ratios.

As a summary of the parametric studies, the best values for the parameters θ and l_1/t_1 , l_2/t_2 , l_3/t_3 ratios are tabulated in Table 1. The candidate unit cell compliant mechanisms for each of the three configurations are determined with respect to Table 1.

Table 1. The best parameter values found, which results with the highest f_2/f_1 ratio, for all of the mechanism configurations

Parameter	Mechanism A	Mechanism B	Mechanism C
Theta (θ)°	15	60	60
l_1/t_1	0.25	0.25	1.25
l_2/t_2	20	20	20
l_3/t_3	1.25	0.75	0.25

The first candidate compliant structure with Mechanism A configuration is shown in Figure 9. Parameters of the mechanism are determined as; $\theta = \pi/12 = 15^\circ$, $l_1 = 1.25$ m, $t_1 = 5$ m, $l_2 = 10$ m, $t_2 = 0.5$ m, $l_3 = 6.25$ m, $t_3 = 5$ m. The first mode of the mechanism (f_1) is at 1.94 Hz and the second mode is (f_2) at 3.54 Hz. According to these modes, f_2/f_1 ratio of candidate mechanism is calculated as 1.83.

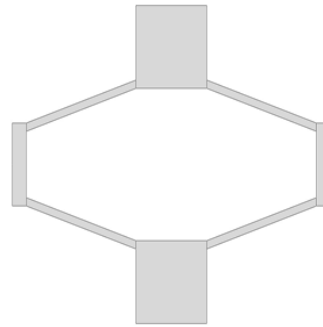


Figure 9. The first candidate mechanism for Mechanism A configuration ($f_2/f_1 = 1.83$)

The second candidate compliant structure with Mechanism B configuration is shown in Figure 10. Parameters of the mechanism are determined as; $\theta = \pi/3 = 60^\circ$, $l_1 = 1.25$ m, $t_1 = 5$ m, $l_2 = 10$ m, $t_2 = 0.5$ m, $l_3 = 3.75$ m, $t_3 = 5$ m. The first mode of the mechanism (f_1) is at 1.48 Hz, whereas the second mode is (f_2) at 1.58 Hz. With these results, f_2/f_1 ratio of the candidate mechanism calculated as 1.07.

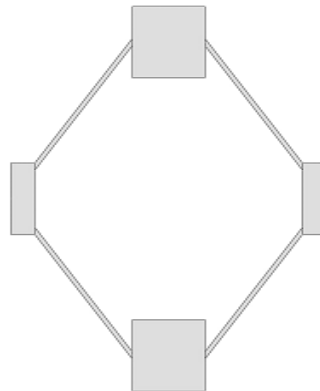


Figure 10. The second candidate mechanism for Mechanism B configuration ($f_2/f_1 = 1.07$)

The third candidate compliant structure with Mechanism C configuration is shown in Figure 11. Parameters of the mechanism are determined as; $\theta = \pi/3 = 60^\circ$, $l_1 = 6.25$ m, $t_1 = 5$ m, $l_2 = 10$ m, $t_2 = 0.5$ m, $l_3 = 1.25$ m, $t_3 = 5$ m. The first mode of the mechanism (f_1) is at 0.97 Hz and the second mode is formed

(f_2) at 1.51 Hz. Calculated f_2/f_1 ratio is equal to 1.55.

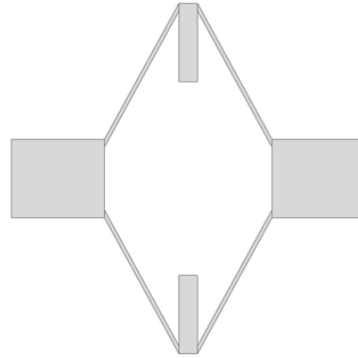


Figure 11. The third candidate mechanism for Mechanism C configuration ($f_2/f_1 = 1.55$)

After completing modal analysis for candidate configurations, it can be seen that the widest vibration isolation frequency band is achieved via the mechanism provided in Figure 9. Therefore, it is determined as the unit cell for the periodic vibration isolator.

3.2. The unit cell mechanism

The first step of the study was to analyze configurations of all proposed mechanisms and to determine the mechanism, which has the highest f_2/f_1 ratio, as the unit cell of the periodic structure. According to the results, mechanism A configuration was selected as the unit cell. In this step, final dimensions of the unit cell are determined and characteristics of the unit cell mechanism is examined with frequency response function (FRF).

The dimensions of the unit cell given with Figure 12 are determined as: $\theta = \pi/12 = 15^\circ$, $l_1 = 12.5$ mm, $t_1 = 50$ mm, $l_2 = 100$ mm, $t_2 = 5$ mm, $l_3 = 62.5$ mm, $t_3 = 50$ mm. The first mode of the unit cell f_1 is seen at 194 Hz and the second mode f_2 is observed at 354.3 Hz. From here, f_2/f_1 ratio is calculated as 1.83.

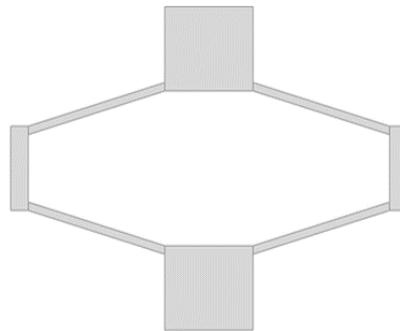


Figure 12. The Unit cell mechanism ($f_1 = 194$ Hz, $f_2 = 354.3$ Hz and $f_2/f_1 = 1.83$)

Here, it should be noted that, mode shape frequencies of compliant mechanisms are only a function of l/t ratios and θ values. Therefore, a change on dimensions only causes the mode shape frequencies to shift upwards or downwards provided that the l/t ratios and θ values remain the same [18-21]. As a result, when their ratio stays the same, then f_2/f_1 ratio stays the same, as well (see Figures 9 and 12). Vibration isolation will be achieved between the range of the first two mode frequencies as for the case in the literature [18-21].

In order to characterize the vibration isolation levels of the unit cell mechanism provided in Figure 12, frequency response function (FRF) must be obtained and examined. To that end, a finite element model is created. Roller-roller boundary conditions are applied to the model, which enables the mechanism to move only in the x direction freely at the boundaries. In addition, displacement inputs to the model are provided from the left side in the x direction. As a result, axial displacement inputs are utilized to observe the effect of all modes in the frequency range of interest (0-500 Hz).

The FRF analysis results are presented in Figure 13 as a displacement transmissibility plot. Here, one can see that, the suggested unit cell mechanism in Figure 12 can provide vibration isolation between 194-370 Hz. As can be seen, vibration isolation starting and ending frequencies are closely related with the first and the second mode shape frequencies of the mechanism, which is a result compatible with the literature [18-21]. Within this frequency band (194-370 Hz), at least 25 % vibration isolation can be achieved only by using one mechanism.

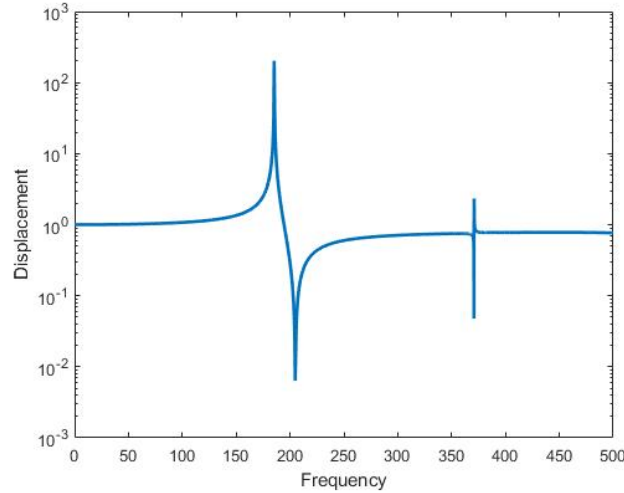


Figure 13. The displacement transmissibility (FRF) of the unit cell mechanism.

3.3. The periodic structure

The goal in this study was to determine a unit cell which provides the highest f_2/f_1 ratio among candidate mechanisms and create a periodic structure with repeated unit cell mechanism. After determination of unit cell mechanism and the geometrical properties for it in the previous section, periodic media can be created and examined properly. As it is previously shown in the literature [18-21], when the number of repeating unit cells in periodic structure is raised then vibration isolation levels achieved via the periodic structure increases, as well. The periodic structure in this study is created with 3 repetition of the unit cell mechanism. Obtained one-dimensional periodic vibration isolator can be seen in Figure 14.

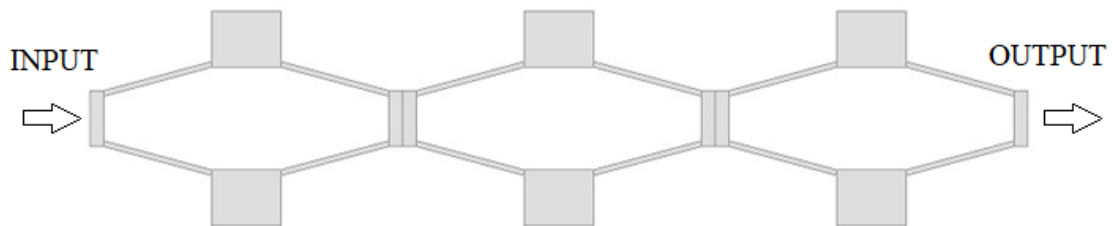


Figure 14. The periodic vibration isolator design.

As indicated in the literature [18-21], it is expected the vibration isolation frequency band starts approximately at 190 Hz, which is the frequency value in the near vicinity of the first mode of the unit cell mechanism, and ends approximately at 360 Hz, which is the frequency value in the near vicinity of the second mode of the unit cell mechanism.

In order to examine the vibration isolation performance of the periodic structure given in Figure 14, the displacement transmissibility (FRF) plot (Figure 15) is calculated with finite element method. Roller-roller boundary conditions are applied as done in the unit cell FRF analysis. Input displacements are provided from one end of the periodic structure and output displacements are taken from the other end (see Figure 14).

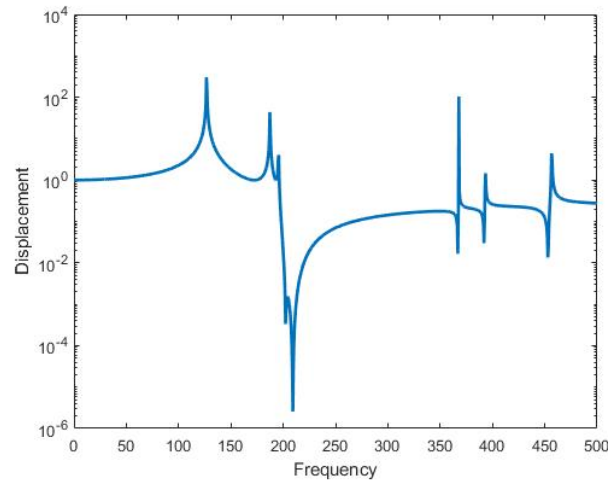


Figure 15. The displacement transmissibility (FRF) of the periodic structure.

It can be seen in Figure 15 that; the periodic structure is performing effective vibration isolation between 190-360 Hz. Despite using only three unit cells in the periodic structure, more than 80 % vibration isolation is achieved throughout the frequency range of interest (i.e., 190-360 Hz). Moreover, if a periodic structure is formed by using more than three unit cell mechanisms, then attained vibration isolation levels will be much higher, as previously shown in the former studies in the literature [18-21]. As a summary, the proposed periodic structure can be utilized as a one-dimensional vibration isolator, in order to mitigate the incoming oscillations from one direction.

4. Conclusion

In this study, a periodic structure, which performs effective vibration isolation at low frequencies, is designed. Firstly, candidate compliant inertial amplification mechanism configurations are proposed and analyzed via parametric studies to determine one of them as the unit cell. Then, a one-dimensional periodic structure is formed by embedding multiple unit cell mechanisms. The periodic structure is analyzed and results obtained from displacement transmissibility (FRF) plots are provided to observe the vibration isolation levels achieved. Considering the results obtained from the study, it is seen that the periodic structure provides effective low frequency vibration isolation for mechanical waves coming from one direction.

However, with this performance, it is also important to consider the manufacturability of these systems. At the present time, modern manufacturing methods such as laser cutting is suitable for producing this kind of monolithic solid mechanism structures, but the production costs will be presumably high. Yet, with developing additive manufacturing methods, it will be possible to produce this kind of periodic vibration isolators with less spending, in the near future.

Acknowledgment

Authors would like to thank Samet Gün for his contribution. Authors would like to give special thanks to Boğaziçi University for providing ABAQUS software usage.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.
- [2] S. G. Kelly, *Mechanical Vibrations: Theory and Applications*, Stamford: Cengage Learning, 2012.
- [3] D. J. Inman, *Engineering Vibrations*, Upper Saddle River: Pearson Education, 2014.
- [4] R. A. Ibrahim, "Recent advances in nonlinear passive vibration isolators," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 314, no. 3-5, pp.

371-452, 2008. doi:10.1016/j.jsv.2008.01.014

[5] C. Liu, X. Jing, S. Daley and F. Li, "Recent advances in micro-vibration isolation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 56-57, pp. 55-80, 2015. doi:10.1016/j.ymsp.2014.10.007.

[6] P. S. Balaji and K. K. Selvakumar, "Applications of nonlinearity in passive vibration control: a review," *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, vol. 9, pp. 183-213, 2021. doi: 10.1007/s42417-020-00216-3

[7] S. Hao, Z. Wu, F. Li and C. Zhang, "Numerical and experimental investigations on the band-gap characteristics of metamaterial multi-span beams," *Physics Letters A*, vol. 383, no. 36, pp. 126029, 2019. doi:10.1016/j.physleta.2019.126029

[8] L. Zhao, Z. Q. Lu, H. Ding and L. Q. Chen, "Experimental observation of transverse and longitudinal wave propagation in a metamaterial periodically arrayed with nonlinear resonators," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 170, pp. 108836, 2022. doi:10.1016/j.ymsp.2022.108836

[9] C. Yilmaz, G. M. Hulbert and N. Kikuchi, "Phononic band gaps induced by inertial amplification in periodic media," *Physical Review B*, vol. 76, no. 5, pp. 054309, 2007. doi: 10.1103/PhysRevB.76.054309

[10] C. Yilmaz and G. M. Hulbert, "Theory of phononic gaps induced by inertial amplification in finite structures," *Physics Letters A*, vol. 374, no. 34, pp. 3576-3584, 2010. doi:10.1016/j.physleta.2010.07.001

[11] S. Taniker and C. Yilmaz, "Generating ultra wide vibration stop bands by a novel inertial amplification mechanism topology with flexure hinges," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 106, pp. 129-138, 2017. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2016.11.026

[12] A. H. Orta and C. Yilmaz, "Inertial amplification induced phononic band gaps generated by a compliant axial to rotary motion conversion mechanism," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 439, pp. 329-343, 2019. doi:10.1016/j.jsv.2018.10.014

[13] C. Xi, L. Dou, Y. Mi and H. Zheng, "Inertial amplification induced band gaps in corrugated-core sandwich panels," *Composite Structures*, vol. 267, pp. 113918, 2021. doi:10.1016/j.compstruct.2021.113918

[14] M. Barys, J. S. Jensen and N. M. M. Frandsen, "Efficient attenuation of beam vibrations by inertial amplification," *European Journal of Mechanics - A/Solids*, vol. 71, pp. 245-257, 2018. doi:10.1016/j.euromechsol.2018.04.001

[15] J. Zhou, L. Dou, K. Wang, D. Xu and H. Ouyang, "A nonlinear resonator with inertial amplification for very low-frequency flexural wave attenuations in beams," *Nonlinear Dynamics*, vol. 96, pp. 647-665, 2019. doi:10.1007/s11071-019-04812-1

[16] S. Chowdhury, A. Banerjee and S. Adhikari, "Enhanced seismic base isolation using inertial amplifiers," *Structures*, vol. 33, pp. 1340-1353, 2021. doi:10.1016/j.istruc.2021.04.089

[17] Y. Zeng, L. Cao, S. Wan, T. Guo, Y. F. Wang, Q. J. Du, B. Assouar and Y. S. Wang, "Seismic metamaterials: generating low-frequency bandgaps induced by inertial amplification," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 221, pp. 107224, 2022. doi:10.1016/j.ijmecsci.2022.107224

[18] G. Acar and C. Yilmaz, "Experimental and numerical evidence for the existence of wide and deep phononic gaps induced by inertial amplification in two-dimensional solid structures," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, no. 24, pp. 6389-6404, 2013. doi:10.1016/j.jsv.2013.06.022

[19] O. Yuksel and C. Yilmaz, "Shape optimization of phononic band gap structures incorporating inertial amplification mechanisms," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 355, pp. 232-245, 2015. doi:10.1016/j.jsv.2015.06.016.

[20] O. Yuksel and C. Yilmaz, "Size and topology optimization of inertial amplification induced phononic band gap structures," *In Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2017, Tampa, Florida, USA, p. V013T01A007. doi:10.1115/IMECE2017-71342

[21] O. Yuksel and C. Yilmaz, "Realization of an ultrawide stop band in a 2-D elastic metamaterial with topologically optimized inertial amplification mechanisms," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 203, pp. 138-150, 2020. doi:10.1016/j.ijsolstr.2020.07.018

[22] Z. Cheng, A. Palermo, Z. Shi and A. Marzani, "Enhanced tuned mass damper using an inertial amplification mechanism," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 475, pp. 115267, 2020. doi:10.1016/j.jsv.2020.115267

[23] S. Muhammad, S. Wang, F. Li and C. Zhang, "Bandgap enhancement of periodic nonuniform metamaterial beams with inertial amplification mechanisms," *Journal of Vibration and Control*, vol. 26, no. 15-16, pp. 1309-1318, 2020. doi:10.1177/1077546319895630

[24] J. Li, P. Yang and S. Li, "Phononic band gaps by inertial amplification mechanisms in periodic composite sandwich beam with lattice truss cores," *Composite Structures*, vol. 231, pp. 111458, 2020. doi:10.1016/j.compstruct.2019.111458

[25] N. M. M. Frandsen, O. R. Bilal, J. S. Jensen and M. I. Hussein, "Inertial amplification of continuous structures: Large band gaps from small masses", *Journal of Applied Physics*, vol. 119, pp. 124902, 2016. doi: 10.1063/1.4944429

[26] S. Taniker and C. Yilmaz, "Design, analysis and experimental investigation of three-dimensional structures with inertial amplification induced vibration stop bands," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 72, pp. 88-97, 2015.

doi:10.1016/j.ijisolstr.2015.07.013

[27] K. Mizukami, K. Funaba and K. Ogi, "Design and three-dimensional printing of carbon-fiber-composite elastic metamaterials with inertial amplification mechanisms," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 513, pp. 116412, 2021. doi:10.1016/j.jsv.2021.116412

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Impact Analysis of Path Selection Strategies over Blockchain-based Routing in Multi-Domain SDN

Evrım Guler^{*a}

Submitted: 08.09.2022 Revised: 26.11.2022 Accepted: 03.11.2022 doi:10.30855/gmbd.0705040

ABSTRACT

Over the past decade, one of the most commonly utilized inventions in the realm of computer communications is Software-Defined Networking (SDN). Among many other lauded advantages, the architecture of SDN supported by OpenFlow communication protocol potentially provides an End-to-End (E2E) path throughout multiple networks under the consideration of Quality of Service (QoS) metrics while supporting network administrators to manage the granular flows. We previously introduced QoSChain, which combines the benefits of SDN and blockchain technology to provide QoS for inter-networks. For the aim of enabling policy automation in cross-networks, E2E visibility, assurance, validation, and control, this framework orchestrates a software-driven traffic management system. In this study, our main focus is on the influence of various path computation options on overall QoSChain performance. In particular, we assess the effectiveness of five simple yet effective solutions for path selection: First Feasible Path Selection (FFPS), Random Feasible Path Selection (RFPS), Minimum Hop Path Selection (MHPS), FFPS with the Border Gateway Protocol (BGP) shortest path at inter-network level (FFPS_BGP), and MHPS with the BGP shortest path at inter-network level (MHPS_BGP). Our experimental results indicate that path selection is crucial to overall performance while minimizing hop counts to deliver superior performance at the expense of initially longer setup times.

Keywords: QoS, SDN, Blockchain, Inter-Domain, Path Selection

^{a*} Bartın University,
Faculty of Engineering,
Architecture and Design,
Dept. of Computer Engineering
74100 - Bartın, Türkiye
Orcid: 0000-0002-7226-4748
e mail: evringuler@bartin.edu.tr

*Corresponding author:
evringuler@bartin.edu.tr

Çok Alanlı YTA'da Blok Zinciri Tabanlı Yönlendirme Üzerinden Yol Seçim Stratejilerinin Etki Analizi

ÖZ

Son on yılda, Yazılım Tanımlı Ağ Oluşturma (YTA), bilgisayar iletişimi alanında en yaygın kullanılan buluşlardan biri haline geldi. OpenFlow tarafından etkinleştirilen YTA mimarisi, diğer pek çok övgüye değer avantajın yanı sıra, ağ yöneticilerine ağlar arasındaki akışlar için Uçtan Uca (E2E) Hizmet Kalitesi (QoS) garantili yollar sağlama konusunda yardımcı olma potansiyeline sahiptir. Daha önceki çalışmamızda, ağlar arası QoS provizyonu için blok zinciri teknolojisi ve YTA'nın faydalarını birleştiren QoSChain'i tanıtmıştık. Bu çerçevede, ağlar arası politika otomasyonu, güvence, E2E görünürlüğü, kontrol ve doğrulamayı etkinleştirmek için yazılım odaklı bir trafik yönetim sistemini düzenler. Bu çalışmada, yol seçim stratejilerinin genel QoSChain performansı üzerindeki etkisine odaklanıyoruz. Spesifik olarak, beş basit ama etkili yol seçim stratejisinin performansını değerlendiriyoruz: İlk Uygun Yol Seçimi (FFPS), Rastgele Uygun Yol Seçimi (RFPS), Minimum Atlama Yolu Seçimi (MHPS), Sınır Ağ Geçidi Protokolü (BGP) ile ağlar arası düzeyde FFPS (FFPS_BGP) ve Sınır Ağ Geçidi Protokolü (BGP) ile ağlar arası düzeyde MHPS (MHPS_BGP). Deneysel sonuçlarımız, başlangıçta daha uzun kurulum süreleri olmasına rağmen üstün performans sağlayan atlama sayısı minimizasyonu ile yol seçiminin genel performans için çok önemli olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Servis Kalitesi, Blokzincir, YTA, Çoklu Alan, Yol Seçimi

1. Introduction

With the proliferation of various Internet applications (e.g., VoIP, video conferencing, online gaming, etc.), more sophisticated and efficient routing mechanisms are required to meet the QoS demands and requirements of the applications. However, due to different unsolved concerns including the limited global view of network infrastructures, per-hop decisions, and limited Quality of Service (QoS) abilities for network flows, End-to-End (E2E) routing in today's traditional networking is an ossified problem. In current network architecture, Software-Defined Networking (SDN) and OpenFlow protocol offer to promise and at the same time forward-looking solutions for routing problems. The OpenFlow protocol and Software-Defined Networking (SDN) provide a potential and promising solution to figure out the QoS-based E2E routing issues of the existing networking architecture. The SDN decouples control and data planes through the use of a logically centralized controller component, providing several options for routing capabilities and enabling QoS. QoS-based E2E routing per service flow both inter-networks and intra-networks with the help of SDN and OpenFlow becomes more simple, scalable, and time-efficient than traditional network systems [1].

In recent years, a new technology called Blockchain (BC) has emerged, drawing considerable interest from researchers and practitioners, and being recommended for implementation in a variety of application scenarios [2]. Some of these research studies achieve network-infrastructure research by integrating BC infrastructure [3-7]. The authors in [3] provide an Ethereum-based approach to implementing a smart contract for service creation with QoS parameters. The authors of [4] suggest a unique BC-integrated orchestration structure for content dissemination networks to prevent significantly increasing loads. For example, [5] provides a plausible routing strategy for acquiring E2E path information by using blockchain nodes, but in a wireless sensor network, a model powered by reinforcement learning technique is utilized to assist in efficiently selecting routing links connecting dynamically picked routing nodes. The authors of [6] provide a safe BC-enable Border Gateway Protocol (BGP)-based routing technique that maintains a common knowledge of the Internet's routing mechanisms, avoids BGP hijacking, and prevents unauthorized use of BGP. Decentralized route discovery to a gateway or destination device in a delay-tolerant Internet of Things (IoT) network, the study in [7] represents a BC-based contractual routing protocol.

These BC and SDN-focused publications present networking-focused investigations, however, they do not examine the implications of path selection algorithms in their recommendations. In this study, we investigate the performance of our previously suggested BC-enhanced QoS-based inter-domain routing system, which is distinct from the works described above, using various path selection algorithms.

In our previous work, by incorporating BC technology into SDN networks, we introduced a revolutionary QoS-enabled inter-network routing system, namely *QoSChain* [8]. We explore extensively in this work a topic that was left unaddressed in the original work as the impact of several path selection techniques on the *QoSChain*'s overall performance. Our recent work [9] represented several fundamental path selection strategies that are called *First Feasible Path Selection (FFPS)*, *Random Feasible Path Selection (RFPS)*, and *Minimum Hop Path Selection (MHPS)*. In this paper, we define new path selection strategies, namely *FFPS with Border Gateway Protocol (BGP) at the inter-network level (FFPS_BGP)*, and *MHPS with BGP at the inter-network level (MHPS_BGP)* to compare the performance of required time to set up a flow, the number of exchanging and processing messages, the bandwidth-hop count product, and a composite metric of bandwidth and delay of the chosen paths are used in turn to approximate the network resource consumption. In the experimental results, we indicate that MHPS achieves better performance than the other approaches while having slower initial connection request acceptance in various network topologies.

In the rest of the paper, we provide SDN and BC background in Section 2. The literature review of blockchain-enabled routing is introduced in Section 3. Path selection tactics, the workflow of the path selection framework, and a BC-enhanced, QoS-aware cross-domain routing framework are all investigated in Section 4. Sections 5 and 6 explain the experimental results of our study and finalize the paper, respectively.

2. Architecture of Blockchain Enhanced Software Defined Networking

The Software Defined Network (SDN) consists of data, control, and application planes as shown in Figure 1.

The data plane, which makes up most of the bottom plane, comprises various network components, including virtual and physical switches and routers, access points, and so on. Through Controller-Data Plane Interfaces, SDN controllers can interact with and control these devices (C-DPIs). The OpenFlow communication protocol [10] is extensively used C-DPI standard to support the interaction between data plane devices and controllers, and packet forwarding is a crucial and basic data plane function.

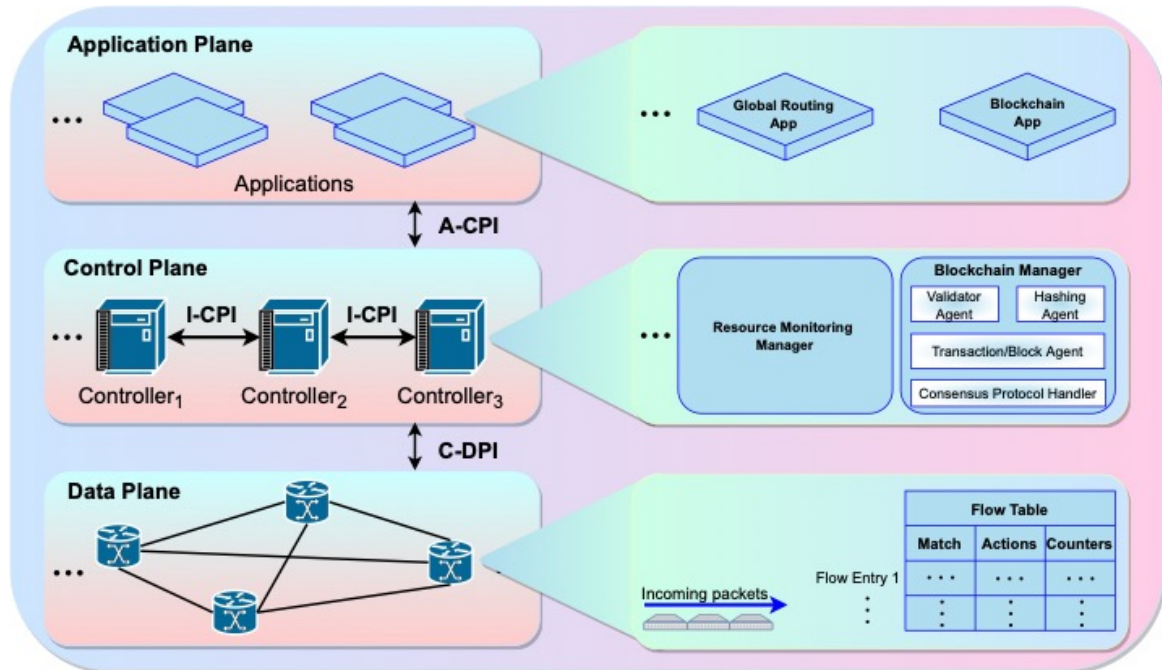


Figure 1. SDN architecture

An SDN controller's middle plane is mainly composed of one or more software-based SDN controllers, depending on the architecture, that offers control capabilities by using a C-DPI to observe network forwarding behavior. The control plane includes the interfaces between controllers in the plane (i.e., the Application Controller Plane Interface, or A-CPI) as well as the interfaces between controllers and network devices (i.e., the Intermediate-Controller Plane Interface, or I-CPI). The I-CPI is intended to transfer information between controllers but is not standardized. Interaction between the controller(s) and network applications is made possible by an A-CPI for network management, security, and other reasons (or services). To control controller behavior, controllers have a variety of functional parts (e.g., a topology manager, a virtualizer, etc.).

The application plane, which is made up of network applications, is the top plane of an SDN. These applications interact with controller(s) via an open A-CPI and use an abstract view of the network to make decisions to perform specific network functions (e.g., REST API).

A data plane router or switch that supports OpenFlow [11] provides the process of transmitting network packets by considering user-defined flow entries in a number of flow tables. Each flow entry in the table is consisting of *Counters*, *Actions*, and *Match* that are used in TCP/IP to establish the flow entry's primary focus on a specific packet header, to apply entities required in the Match field to a packet, and to keep specified information (such as packets, flows, networks, etc.).

Figure 2 indicates the architecture of a block and blockchain. The structure of a block is made up of a list of transactions (T_x) in a block body and a block header to specify various data for the block. The block header may include various transaction details such as a timestamp, an identification number, a difficulty variable, the encrypted value of a transaction in a Merkle tree, the hashed value of the

previous/parent block, and a changing variable in each computation, depending on the blockchain use cases and consensus protocols.

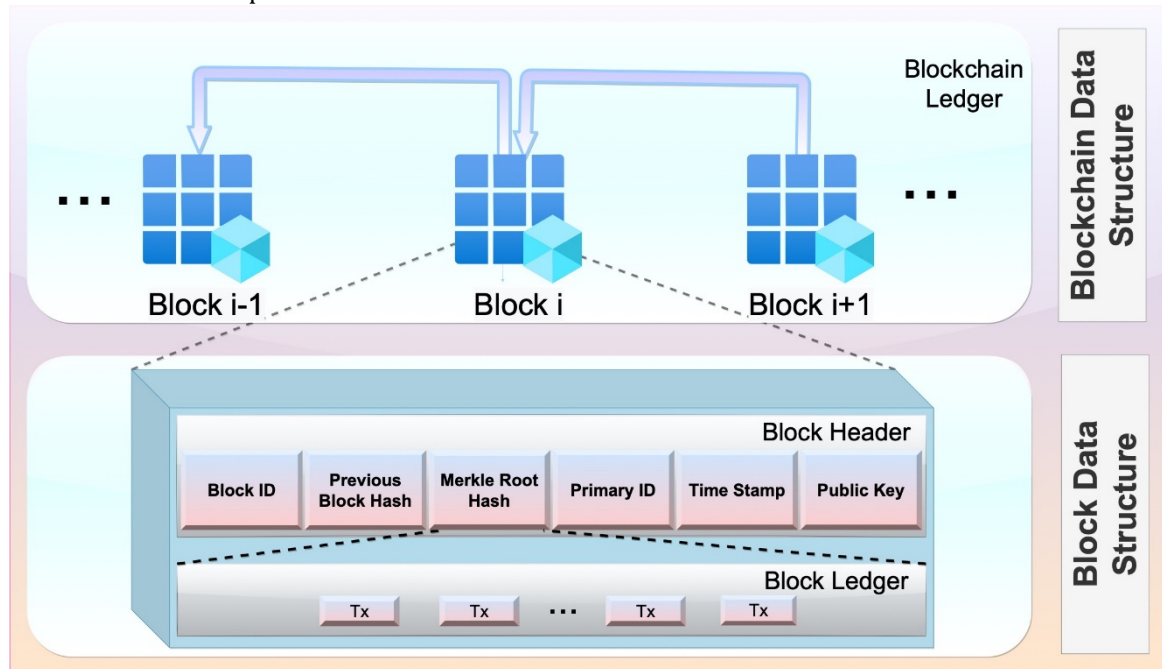


Figure 2. Blockchain and block data structures

Each user has a set of private and public keys that they can use to conduct transactions on the network. To gain access to the network, users must authenticate using private keys. Each user examines the published transactions on the blockchain and discards any blocks that include incorrect transactions. The hashed value of the previous block needs to be checked until reaching the *Genesis Block* as the first block. Any member attempting to alter data in their network is not permitted to edit earlier blocks. As a result, a blockchain's structure is impenetrable, and All nodes on the network must agree on a consensus protocol (e.g., Proof-of-Work) with various features ensuring the integrity of data in order to add a new block to the chain. [12].

3. Related Work

In the literature, there are numerous studies that introduce BC applications that are used in a variety of fields (e.g., IoT, cloud computing, supply chains, and healthcare systems). For this purpose, various research studies focus on BC-based routing frameworks in the literature [3-7, 13, 14] whereas none of these studies considers QoS-based E2E path selection framework over multi-domain SDN ISPs. There is a close study in [15] that proposes a multi-domain latency-aware routing scheme in SDN networks. Every pair of connected ISPs' round-trip times is periodically measured by the suggested architecture, which then stores the results in a distributed, decentralized BC network. The BC network's latency measurement data is processed by SDN controllers, who also verify data integrity and oversee latency-aware routing for real-time data flows. On the other hand, except in our previous works [8, 16] that are used in this research as a main part of the routing framework, QoS-aware E2E path determination over multi-domain SDN ISPs is not well-studied, especially path selection efficacy on the utilization of network resources.

The authors in [17] introduce SDN-enabled networking architecture with blockchain technology while integrating the security and autonomy management layers to advance multi-layer communication in SDN networks. The authors in [18] develop a framework that consists of trust and verifying QoS compliance for E2E routing over multi-domain SDNs. To store and exchange the various types of trust data needed to provision and validate E2E QoS compliance of the domains, TRAQR effectively takes advantage of blockchain specifications such as the tamper-proof and decentralized infrastructure. In [19], the authors employ a cross-domain routing framework to implement the trusted relationship for various SDN controllers in a multi-domain network. The authors of [15] propose SDN instances processed latency measurement data that are periodically posted and stored in blocks for validating

the integrity of data and managing real-time data flows by considering latency-aware routing in a blockchain network. In [20], controller(s) create blocks including flow rules-based transactions for incoming flows, and send them to all switches under its control after validating based on the network topological view. The authors of [21] propose a blockchain-enabled infrastructure to transmit correlated flows between social network users while focusing on minimal link overlapping in a set of paths by using a topology manager module, flow association, and path selection modules over SDN controllers.

4. BC-Enhanced QoS-Aware Inter-Network Routing Framework with Various Path Selection Strategies

This study analyzes the implications of alternative path selection strategies on the underlying network by leveraging and enhancing our blockchain-enhanced Quality of Service (QoS)-aware SDN-based inter-network routing framework proposed in our earlier study [8]. In this section, we introduce a recap of the routing architecture, an explanation of the various path selection algorithms employed, and the overall framework's workflow to accomplish this objective and make the investigation self-contained and reader-friendly.

The Internet is made up of interconnected entities that send data from the origin to a target. They connect geographically separated communication devices and networks whose IP prefixes are given to an Internet Service Provider (ISP) with predetermined routing policies. The organization known as the Internet Assigned Numbers Authority (IANA) assigns a specific ISP Number to each ISP on the Internet, which is used in inter-ISP routing, also known as inter-domain routing, as an identity [22]. An ISP is in charge of data transmission between its networks and networks hosted by neighboring ISPs. To that end, an ISP uses the Interior Gateway Protocol (IGP) to connect its inner devices to its domains and the Exterior Gateway Protocol (EGP) to connect to nodes in neighboring ISPs. Inter-ISP relationships are formed between ISPs and can be peering or customer-provider interaction.

4.1. BC-Enhanced QoS-Aware inter-network routing framework

An illustrated network architecture is shown in Figure 3 that consists of five SDN-based inter-networks or ISPs and a blockchain network between the network controllers is used to keep track of the network's status for E2E routing regarding transactions and created blocks. In Figure 3, cylindrical objects with interconnecting links (i.e., thick black solid lines) represent border nodes of the networks, and through various networks, hexagonal objects without interconnection links show the core network devices.

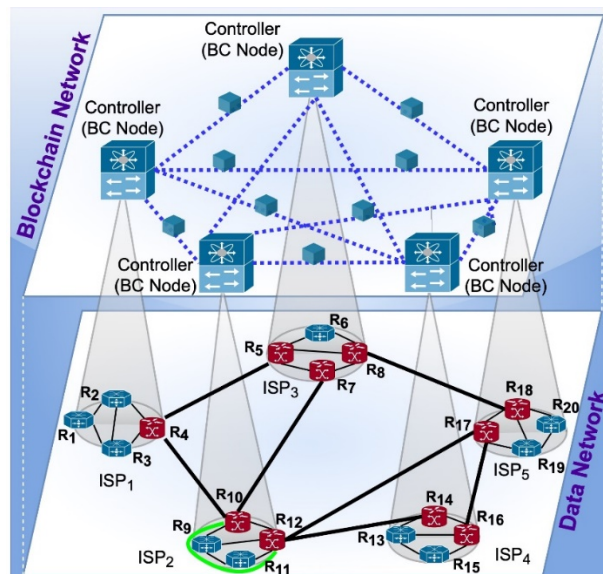


Figure 3. A blockchain-enabled SDN model

Blockchain-Enhanced SDN Controller: For blockchain capabilities in the SDN controller utilized in the routing architecture, Figure 1 depicts the new controller modules, as well as the existing ones and network applications that have been implemented. The Blockchain Manager (BM) module in a network controller is in charge of all blockchain-related operations. Based on the blockchain's block validation

rules, the *Validator Agent* is to validate the blocks that are incoming from other controllers. Before being sent to the blockchain network, transactions and blocks are hashed by the *Hashing Agent* module. The implementation of the transactions and/or blocks that make up the blockchain network, as well as the blockchain network's consensus algorithm, is handled by the *Transaction/Block Agent* and *Consensus Protocol Handler*, respectively. It is the responsibility of the Resource Monitoring Manager (RMM) to keep an eye on network resources like bandwidth and delay and to alert the BM module to set up the appropriate transaction(s) when anything changes. Global Routing App (GRA) is in charge of putting inter-network routing functionalities into place when the controller receives an inter-network service request. The Blockchain Application (BA) module assists with handling service request messages as well as transferring blocks between the blockchain network and its clients.

Pathlet: A pathlet is a section of a clear path connecting two border node pairs at the *Ingress* and *Egress* points. The pathlet end-points are *Ingress* and *Egress* nodes that are in the same network. For instance, the pathlet between the two border nodes is shown as a partial green pathlet in Figure 3.

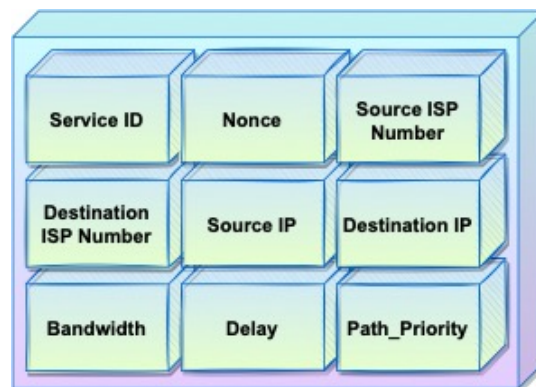


Figure 4. Data structure of Service Request (SR)

Service Request: According to the routing framework, a *Service Request (SR)* is a request for the provisioning of connectivity between users (i.e., computers) on the same or different networks using specific QoS parameters, such as bandwidth and delay. Theoretically, users may ask for any rate of service (bandwidth and/or delay), and a continuous-rate network must be able to support arbitrary (service) requests. The *SR* data structures in the framework are shown in Figure 4. An *SR* message contains the following information:

- Service ID: The persistent service identifier for a service.
- Nonce: Randomly generated distinct *Service Request ID*.
- Source and Destination ISP Number: ISP numbers of the source/destination ISPs, respectively.
- Source and Destination IP: The source and destination computers' IP addresses, respectively.
- Bandwidth: The bandwidth demand of a service request over the E2E path.
- Delay: The acceptable delay for a service request over the E2E path.
- Path_Priority: The prioritized parameters of the E2E path regarding QoS parameters to indicate path selection preference order (i.e., *FFPS*, *RFPS*, *MHPS*, *FFPS_BGP*, and *MHPS_BGP*), whose details are provided in Section 4.2.

The *SR* message is generated by a relevant program on a user's computer and is then forwarded to the relevant (source) network controller.

On the blockchain network, using cryptographic processes with a set of public and private keys, each node on the network runs its own blockchain instance and correlates to a network controller in the routing architecture. In this article, the terms *blockchain node* and *ISP controller* will be used interchangeably. An IP address and a pair of public and private keys are both present on a blockchain node for cryptographic operations. Peer-to-Peer (P2P) full-mesh networking is used by blockchain nodes to communicate over the Internet. To establish a peering relationship, ISP controllers trade their public keys and bind them to distinctive identifiers of blockchain nodes (i.e., ISP Number). The controllers broadcast their public keys together with their digitally signed networking data and ask other nodes for the same info (e.g., IP addresses, ISP numbers, lists of border nodes, etc.). *Keep-alive*

messages are used by blockchain nodes to manage whether or not their peers are still alive. The other peer ends the peering connection with the blockchain node if a peer does not respond.

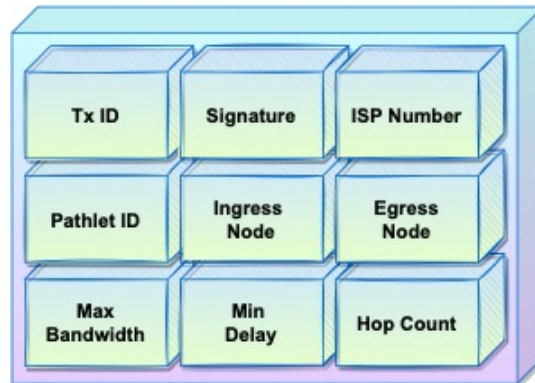


Figure 5. The data structure of a transaction in BC-enabled QoS-aware inter-network routing

Transaction: In the routing framework, blockchain nodes generate transactions from pathlets and their QoS values (i.e., controllers). Network controllers generate unique pathlets for each pair of border nodes in their respective networks in order to add them to the blockchain ledger. Figure 5 demonstrates a transaction data structure within the routing framework. A transaction contains the following information:

- Tx ID: The transaction's distinct ID
- Signature: The blockchain node (i.e., ISP controller) that created the transaction's digital signature by utilizing its private key.
- ISP Number: The unique ISP number, which is used as an identifier in inter-ISP routing.
- Pathlet ID: The unique ID of a distinct pathlet.
- Ingress and Egress Node: The ending points (i.e., start and end node) of a pathlet in an ISP, respectively. Each ISP will share its border node IDs with the other ISPs participating in the blockchain in advance.
- Max Bandwidth and Min Delay: The pathlet's satisfying maximum bandwidth and providing minimum delay.
- Hop Count: The number of hops in a corresponding pathlet in an ISP.

A blockchain sends a transaction to a node connected to the blockchain network, which verifies the transaction's validity. Transactions that are invalid are discarded. Other connected nodes receive valid transactions that were previously unknown to the node. The transactions will eventually reach every node in the network after these further validate them and send them to their peers. The transaction data validation rules determine which data is required to represent a transaction. Each blockchain node in the framework needs to validate transactions using a set of rules that ensure: (i) the transactions are required to be digitally signed, (ii) QoS-related bandwidth and delay fields of a transaction are positive values, (iii) ISP number needs to be a valid number and available, (iv) ingress and egress node IDs in the transaction belong to the network, where the transaction is generated.

Table I shows transactions created by ISP2 controller for pathlets between R10 and R12 border devices in ISP2 network shown in Figure 3. The table shows transactions only for pathlets among R10 and R12. The transaction with ISP2_6 ID is created for the interconnecting link from R10 to R4 in ISP2 and ISP1. When an ISP joins the blockchain network, it begins by propagating the first transactions to the appropriate blockchain nodes for the pathlets among the border network devices shown in the table. The controller produces a new transaction (referred to as an *update transaction*) reflecting the state change on the pathlet whenever there is a QoS-related network state change, such as a bandwidth update in a link. To illustrate how to create a transaction in Table I, once ISP2 participates in the blockchain network, the ISP begins to create its initial transactions that hold corresponding data for the distinct pathlets among the border devices R10 and R12. The initial transactions with IDs ISP2_1, ISP2_2, and ISP2_3 are for different pathlets having their IDs {R10_R12_1 (R10-R12), R10_R12_2 (R10-R9-R12), and R10_R12_3 (R10-R9-R11-R12) between R10 and R12, respectively. Only the appropriate owner controller is able to reach the pathlet's details (i.e., complete network device list across a pathlet as ISP2 controller in this case). The controller initiates update (new) transactions for the pathlets when

a bandwidth update of a link occurs in the network, assuming that the bandwidth increased from 5 Mbps to 15 Mbps in the connection between R10 and R9. As seen in the table, the transactions with IDs ISP2_4 and ISP2_5 are the newly updated transactions for previous transactions with IDs ISP2_2 and ISP2_3 while reflecting the updated available bandwidth for the pathlets with IDs R10_R12_2 and R10_R12_3 as 20 Mbps, respectively. Therefore, they have the same pathlet IDs.

Table 1. Transactions generated by ISP2 controller for pathlets between R10 and R12 border devices in ISP2. Transaction with ISP2_6 ID is created for the inter-connecting link from R10 to R4 in ISP2 and ISP1, respectively. Transaction with ISP2_4 Tx ID is an update for the pathlet with ISP2_2 Tx ID and R10_R12_2 Pathlet ID. Similarly, the transaction ISP2_5 Tx ID is an update for the pathlet with ISP2_3 Tx ID.

Tx ID	Signature	ISP Number	Pathlet ID	Ingress Node	Egress Node	Max Bandwidth	Min Delay	Hop Count
ISP2_1	0000kxfg...	ISP2	R10_R12_1	R10	R12	15	5	1
ISP2_2	0000asx34...	ISP2	R10_R12_2	R10	R12	5	12	2
ISP2_3	0000fdxr4...	ISP2	R10_R12_3	R10	R12	10	15	3
ISP2_4	0000ytx6j...	ISP2	R10_R12_2	R10	R12	20	12	2
ISP2_5	0000erfg4...	ISP2	R10_R12_3	R10	R12	20	15	3
ISP2_6	0000uprth...	ISP2	R10_R4_1	R10	R4	40	30	5
:	:	:	:	:	:	:	:	:

Block: Figure 2 depicts the data structures of a block employed in this study's routing scheme. A framework block is comprised of two components as the block header and transactions. Each block header consists of Block ID, Previous Block Hash, Merkle Root Hash, Primary ID of the controller that creates a block in a time interval of block generation, Timestamp, and Public Key of the block-generator controller as follows:

- Block ID: The distinct number of a block.
- Previous Block Hash: The hashed value of the previous block.
- Merkle Root Hash: A data structure where each transaction's hash is merged with all the others to create a single root hash.
- Primary ID: In a block generation interval (epoch), the unique ID of the major blockchain node (ISP controller).
- Timestamp: The time point that the block was released.
- Public Key: The public key of the controller (i.e., the BC node) creating the block.

These data columns can be changed based on the blockchain use case and consensus process. At each epoch, the primary's responsibilities are passed from the list of nodes to the next node. The principal node creates a new block by following the steps outlined below:

- Its transaction pool is where all new transactions are collected.
- The invalid transactions are rejected according to the validation rules of the transaction.
- If time limitations are available, it checks that block creation restrictions are being followed.
- A block is created that includes all valid transactions and is signed with the primary node's private key.
- The other blockchain nodes receive the newly generated block through propagation.

Once the other nodes receive the new block broadcast by the primary, they validate it as follows:

1. After receiving the block, they check that:

- The block was created through a current epoch's primary node that does not produce any other blocks.
- Block is properly created and signed.

2. The transaction validation rules are checked, and the block is created within the block generation limits.

3. If block verification is successful, the new block will be added to the node's blockchain.

4. If block validation was unsuccessful, the block is rejected and sent a bad block transaction.

The blockchain node that produced the faulty block may be blocked or removed from the list of peering nodes if it continues to produce similar blocks.

4.2. Routing framework path selection strategies

In this subsection, we explain the path selection techniques implemented in this research. To determine the QoS-based E2E path of an *SR*, the proposed blockchain-enabled inter-ISP routing framework by satisfying QoS requirements scans all available transactions in the blockchain. A network's path selection approach is as important as its path calculation algorithm/protocol for achieving optimal network resource usage and user quality of experience. For that purpose, we examine and contrast several E2E path selection algorithms, including *First Feasible Path Selection (FFPS)*, *Random Feasible Path Selection (RFPS)*, *Minimum Hop Path Selection (MHPS)* [9], *FFPS with Border Gateway Protocol (BGP) at inter-network level (FFPS_BGP)*, and *MHPS with BGP at inter-network level (MHPS_BGP)*, to investigate the effects on underlying network resources and scalability.

First Feasible Path Selection (FFPS): This strategy by using all available transactions in the blockchain gives preference to choose the first possible E2E path computed at time t to fulfill the *SR*. If we define $P_{E2E}^{s-d,t} = \{P_i^{s-d,t}, 1 \leq i \leq n\}$ as the set of E2E pathways from s to d that fulfill the *SR* at time t as $(P_i^{s-d,t})$, where n is the number of feasible paths and $P_{E2E}^{s-d,t}$ is never equal to zero, then the strategy will choose the path that corresponds to the first computed feasible path ($P_1^{s-d,t} \in P_{E2E}^{s-d,t}$).

Random Feasible Path Selection (RFPS): This technique grants preference, when using all of the transactions that are now accessible in the blockchain, to the path that is randomly chosen from among all of the possible E2E paths that have been computed for the *SR* at time t . When we define $P_{E2E}^{s-d,t} = \{P_i^{s-d,t}, 1 \leq i \leq n\}$ as the set of E2E pathways from s to d that fulfill the *SR* at time t as $(P_i^{s-d,t})$, where n is the number of feasible paths and $P_{E2E}^{s-d,t}$ is never equal to zero, then the strategy will randomly pick a path ($P_i^{s-d,t} \in P_{E2E}^{s-d,t}, 1 \leq i \leq n$) among all available E2E paths.

Minimum Hop Path Selection (MHPS): Using all of the transactions that are currently available in the blockchain, this selection method determines the path that will result in the fewest hops taken out of all of the possible E2E routes that lead from the source to the destination. If we define $P_{E2E}^{s-d,t} = \{P_i^{s-d,t}, 1 \leq i \leq n\}$ as the set of E2E pathways from s to d that fulfill the *SR* at time t as $(P_i^{s-d,t})$, where n is the number of feasible paths and $P_{E2E}^{s-d,t}$ is never equal to zero, then the strategy picks the E2E path (i.e., $\min_{\forall i} L(P_i^{s-d,t})$) that has the minimum number of hops among all feasible E2E paths. $L(P_i^{s-d,t})$ is the length (i.e., number of hops) of an E2E path and can be defined as:

$$L(P_i^{s-d,t}) = 1 + \sum_{\forall e_j^{s-d,t} \in P_i^{s-d,t}} 1, 1 \leq i, j \leq n \quad (1)$$

where $e_j^{s-d,t}$ is a link over the E2E path $P_i^{s-d,t}$.

FFPS with Border Gateway Protocol (BGP) at inter-network level (FFPS_BGP): This technique provides preference to selecting the BGP shortest path at inter-network level [23], while taking the first available path from intra-network level for E2E path computed to satisfy the *SR* at time t by leveraging all of the accessible transactions in the blockchain. Let $I_{E2E}^{s-d,t} = \{I_j^{s-d,t}, 1 \leq j \leq k, j, k \in \mathbb{Z}^+\}$ and $P_{E2E}^{s-d,t} = \{P_i^{s-d,t}, 1 \leq i \leq n\}$ be the sets of E2E shortest inter-network level ISPs (i.e., selected ISPs by BGP-based shortest path) and paths from s to d satisfying the *SR* at time t , respectively, as $(P_i^{s-d,t})$ with n as the feasible paths for each intra-network I_j by using BGP protocol at inter-network level, where $P_{E2E}^{s-d,t} \neq \emptyset$, the strategy will then choose the first feasible path that was calculated ($P_1^{s-d,t} \in P_{E2E}^{s-d,t}$ for each $I_j \in I_{E2E}^{s-d,t}$).

MHPS with BGP at inter-network level (MHPS_BGP): This selection strategy chooses the path that has the minimum hops among all feasible paths in intra-network level by using all available transactions in the blockchain while picking the BGP-based shortest path at inter-network level from source ISP to destination ISP of a *SR*. Let $I_{E2E}^{s-d,t} = \{I_j^{s-d,t}, 1 \leq j \leq k\}$ and $P_{E2E}^{s-d,t} = \{P_i^{s-d,t}, 1 \leq i \leq n\}$ be the sets of E2E shortest inter-network level ISPs (i.e., selected ISPs by BGP-based shortest path) and paths from s to d satisfying the *SR* at time t , respectively, as $(P_i^{s-d,t})$, where $P_{E2E}^{s-d,t} \neq \emptyset$, then the strategy picks the E2E path (i.e., $\min_{\forall i} L(P_i^{s-d,t})$) that has the minimum number of hops among all feasible E2E paths for

each selected $I_j \in I_{E2E}^{s-d,t}$. $L(P_i^{s-d,t})$ is the length (i.e., number of hops) of an E2E path and can be defined as:

$$L(P_i^{s-d,t}) = 1 + \sum_{I_p \in I_{E2E}^{s-d,t}} \sum_{\forall e_j^{s-d,t} \in P_i^{s-d,t}} 1, \quad 1 \leq i, j \leq n, \quad 1 \leq p \leq k \quad (2)$$

where $e_j^{s-d,t}$ is a link over the E2E path $P_i^{s-d,t}$.

4.3. Workflow of path selection framework

Figure 6 indicates the process followed by the E2E path selection method that is based on blockchain technology and prioritizes the QoS of an SR. In Step 2, after receiving an SR from a user, the network controller calculates an E2E path using its blockchain ledger. Taking into account the QoS parameters and path selection priorities (i.e., Path_Priority) mentioned in the SR message, the E2E path is made up of pathlets connecting a source network's edge node to an endpoint on the target network's edge. After calculating available E2E paths, the QoS-based blockchain routing framework rejects the service request by sending a *Reject* message to the user when there is no available E2E path in Step 3. If any E2E path satisfies the required QoS parameters of the SR, the controller of the source ISP in Step 4 initiates the process of sending pathlet request messages to every ISP controller that is contributing a pathlet to the calculated E2E path. In Step 5, if all pathlets are successful in satisfying the requirements of QoS, after receiving messages of pathlet requests in Step 4, the framework initiates the process of disseminating all responses to each network controller over an E2E path. In Step 6, the framework gives a service response message that says "Accept" on the basis of the corresponding QoS requirements.

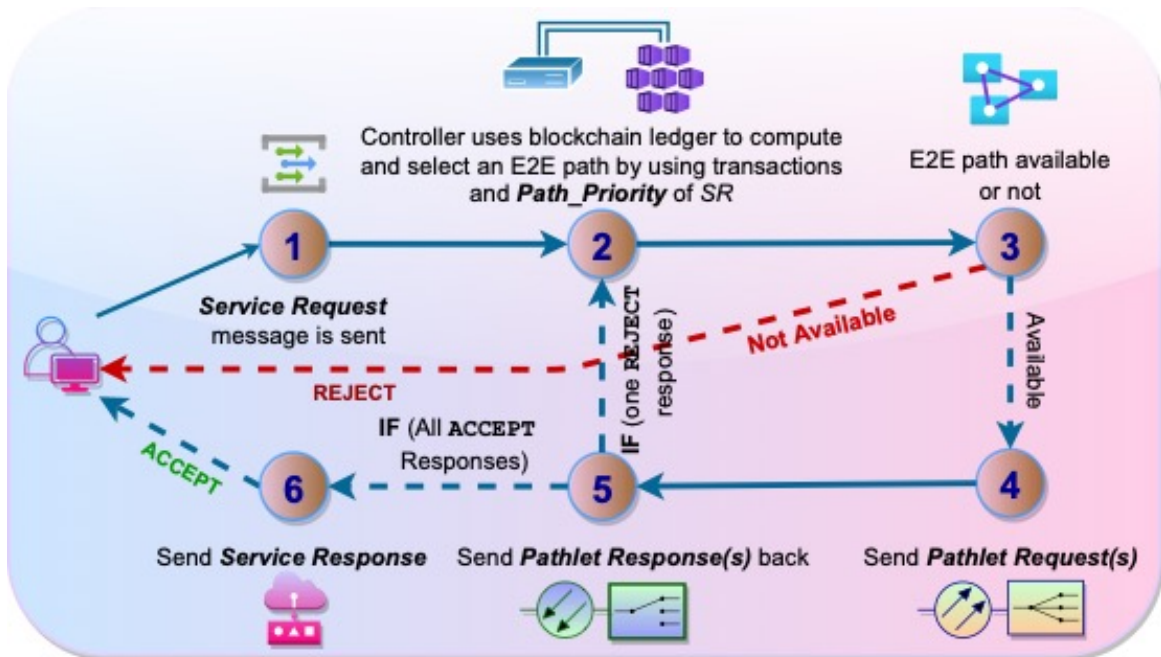


Figure 6. Workflow of inter-network routing with blockchain-enabled procedures

In Step 5, the controller of the source network can start looking for another E2E path that meets the same criteria if any network controllers along the E2E path send the source network controller a *Reject* response. With the help of their intra-network routing, the controllers of the source network and the destination network are responsible for overseeing the segments of the E2E path between the user and the border node of the source network, and between the border node of the destination network and the host at the other end of the path.

5. Experimental Results

In this section, we demonstrate the experimental results of our simulations that indicate the effectiveness and viability of the various QoS-based E2E path [8] finding strategies that were previously introduced, including *FFPS*, *RFPS*, *MHPS* [9], *FFPS_BGP*, and *MHPS_BGP*, in terms of utilizing and

contrasting required time to compute E2E path as Flow Setup Time (FST), overhead of communication messages for setting up the QoS-based E2E path as the number of Messages Exchanged and Processed (MEP), required network capacity for entire data dissemination from source to destination hosts as Network Resource Consumption (NRC), and the impact analysis of simultaneously network capacity and latency as Composite Metric of a Path (CMP). To assess the effect of network varieties on the inter-network communication, we implement the NSFNET and US Backbone network topologies at the inter-ISP level and vary the number of switches in intra-networks in the range of [5, 10]. All intra-network topologies are generated with the degree connectivity of 0.8 by using Erdos-Renyi. For each service request, we define the request with a bandwidth demand in the range of [5, 25]. The physical links in the intra-networks provide the bandwidth capacity in the range of [5, 55] while supporting the bandwidth capacity for each inter-connecting physical links between the inter-ISPs in the experiments is quite enough (i.e., 10 Gbps) to eliminate ignoring service request rejection due to the limitations of the network resource.

In Figures 7-9 and 8-10, according to our calculations, the average number of switches in a network is 7, and the average amount of bandwidth required for each service request is 10.

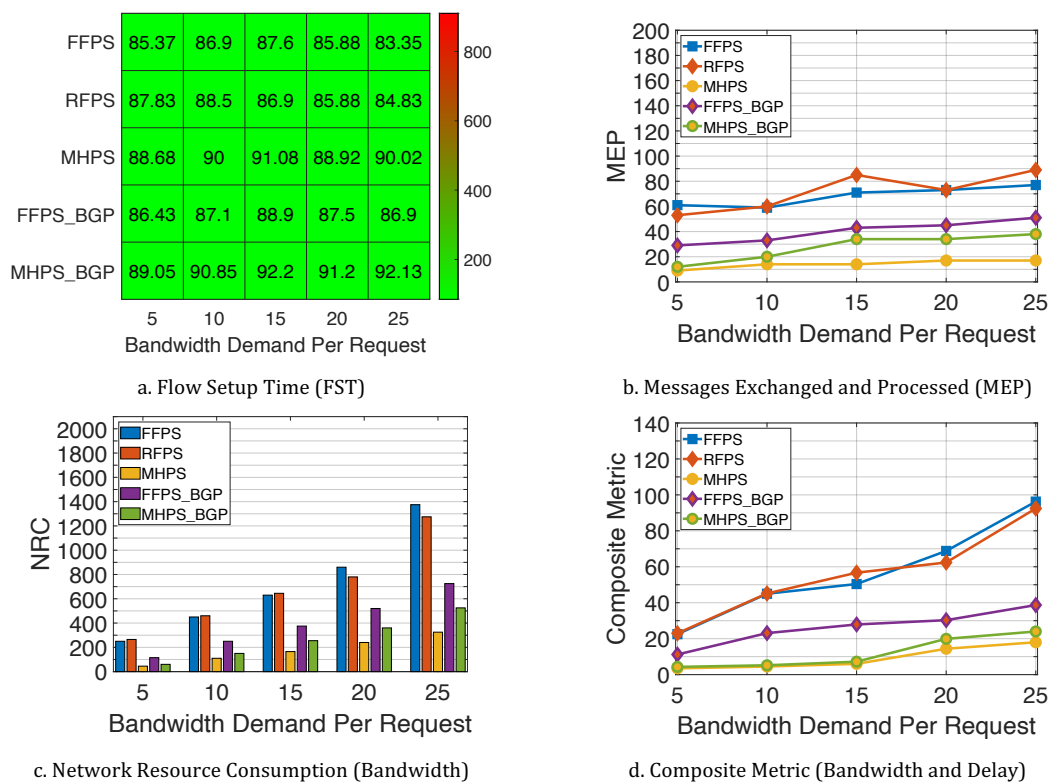


Figure 7. Increasing bandwidth demand in a Service Request (NSFNET ISP Network)

5.1. End-to-end flow setup time

Flow Setup Time (FST) is the amount of time that must pass before the reservation state information may be established along the E2E path that uses QoS. Since it takes into consideration propagation delay, processing time, and path computation, the FST metric is an advantageous statistic that can be used to evaluate the routing and scalability of SDN networks [8].

The impacts of rising bandwidth demand in a service request and the number of switches per network on FST are represented in Figures 7a-9a and 8a-10a, respectively. This is because increasing bandwidth demand restricts the available network resources and reduces the number of possible transactions to choose an E2E path for a request. The proposed path selection strategies have similar flow establishment times in Figure 7a. In contrast, as shown in Figure 8a, a lower total number of switches produces correspondingly lower FST values for networks with fewer than 9 switches. The FST grows larger as the number of switches does, with *MHPS* being the contributor that makes the most significant contribution to this growth. This is because the latter will have to do a lot more work to pick the path

with the fewest hops due to having a higher number of available transactions in the blockchain with a more available network resource.

Figure 9a indicates that the proposed *MHPS* and *MHPS_BGP* approaches have higher FST to satisfy a service request. This is because the strategies look for available transactions to pick a smaller number of hops that are used for QoS-based E2E path from source host to destination host whereas the other approaches pick first or randomly available pathlets from available transactions in the blockchain. Similarly, when the number of switches is increasing, the blockchain will have a higher number of available transactions with distinct pathlets. As seen in Figure 10a, the *FFPS*, *RFPS*, and *FFPS_BGP* strategies outperform the minimum hop path selection strategies because the *MHPS* and *MHPS_BGP* seek a higher number of transactions in the blockchain to find an E2E path with less number of hops.

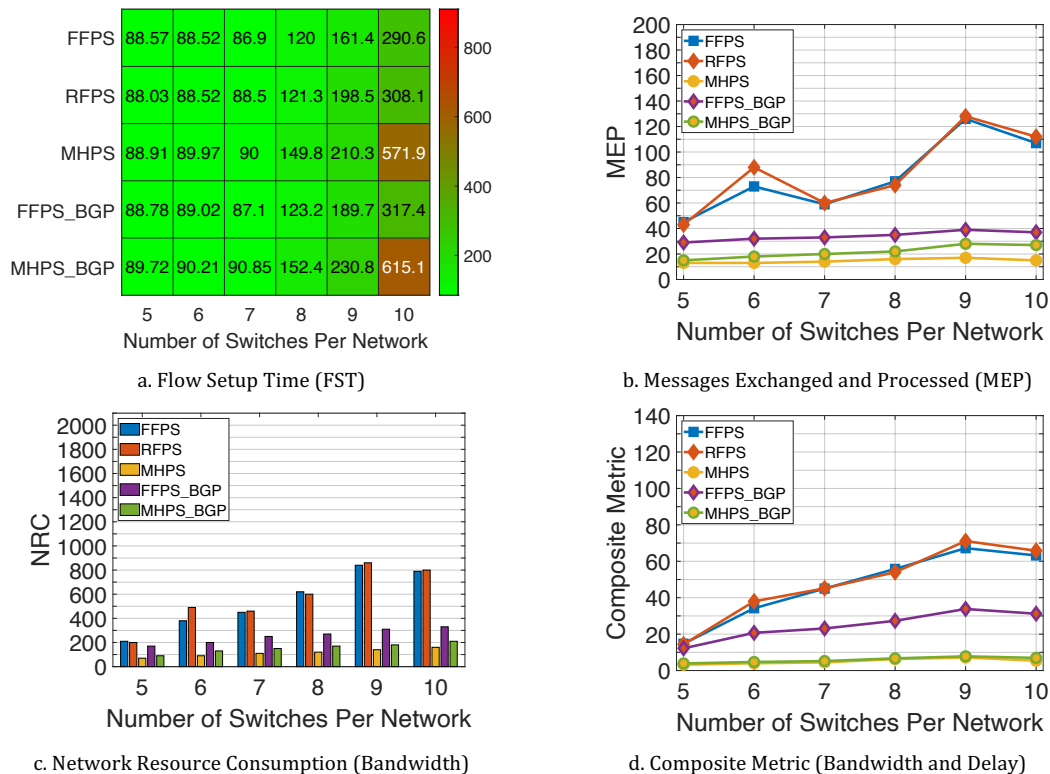


Figure 8. Increasing the number of switch(es) per network (NSFNET ISP Network)

5.2. Messages exchanged and processed

While the network size increases in terms of the number of switches that are used in each network, the network controllers may have to cope with an increase in the number of flow requests and related messages that are processed and sent between network devices (e.g., network devices, hosts, etc.). Additionally, in order to establish a QoS-based E2E link that spans many networks, the controllers communicate with one another and with other controllers that are already present in the network. The controllers of ISP networks may become a bottleneck point due to the limited computational network resources such as CPU and memory as a result of this message exchange and handling operations. In order to provide a QoS-based E2E path for a flow of service requests, controllers make an effort to reduce the total amount of messages that need to be processed and exchanged. As a result, for the purpose of analyzing the effectiveness of routing frameworks in multi-domain SDN networks, the Messages Exchanged and Processed (MEP) is another important indicator to contribute to the overall scalability of a network.

Figures 7b-9b and 8b-10b represent MEP plots for *FFPS*, *RFPS*, *MHPS*, *FFPS_BGP*, and *MHPS_BGP* in a configuration analogous to that used in the FST trials, with variable amounts of bandwidth required per service request and the number of switches used in each network for the NSFNET and US Backbone network topologies, respectively, at the inter-ISP level. As can be seen in the figures, the *MHPS* approach has better performance than all other routing techniques with regard to the MEP measure and

particularly as the demand for bandwidth and the number of switches in each network both increase. Furthermore, the *FFPS_BGP* and *MHPS_BGP* have a better performance of MEP than the *FFPS* and *RFPS* strategies because the *FFPS_BGP* and *MHPS_BGP* approaches use the BGP-aware shortest path at network-level. However, the *MHPS_BGP* strategy cannot guarantee that each BGP-based path at network-level has a smaller number of hops at intra-ISP while the *MHPS* approach forces to pick a QoS-based E2E path from the source host to the destination host by using all available transactions. In other words, in contrast to the other routing systems, which do not need sending additional messages to other networks, the *MHPS* strategy takes an active, explicit approach to the consideration of resource availability when determining the optimal number of hops to take in order to build an E2E path. Both *FFPS* and *RFPS* result in more communications since they select the first and the random feasible path, respectively. In a sense, *MHPS* makes up for the initial longer amount of time spent creating the routes by eventually achieving a higher level of effectiveness in terms of the MEP measure.

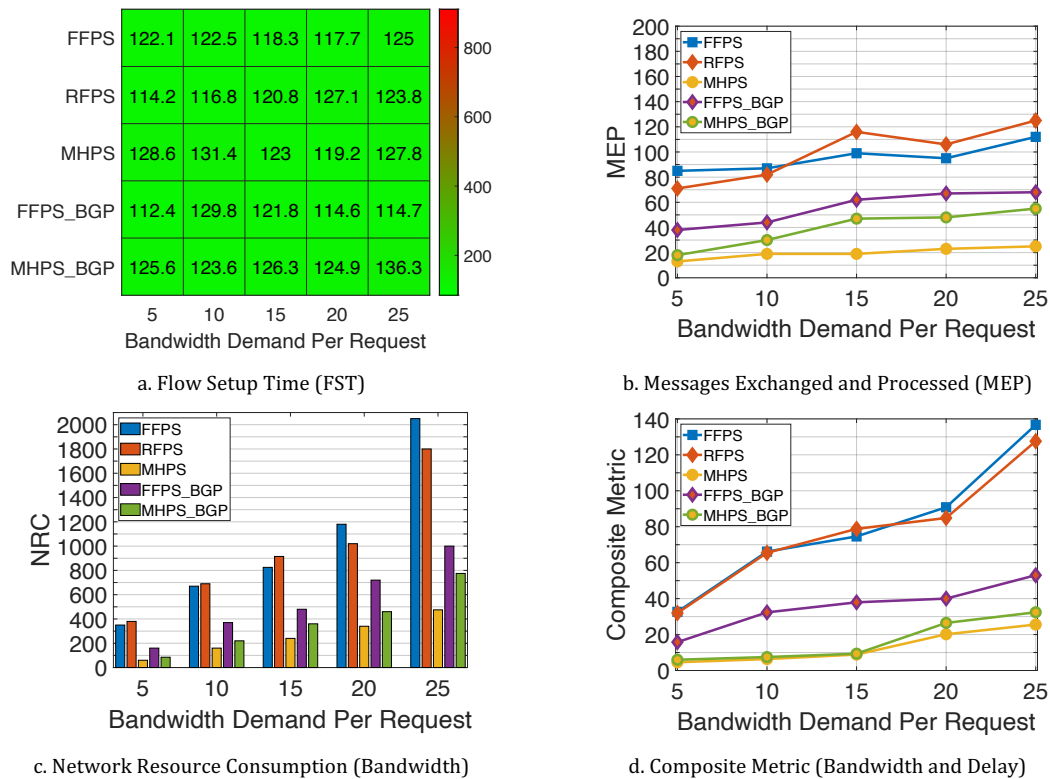


Figure 9. Increasing bandwidth demand in a Service Request (USNET ISP Network)

5.3. Network resource consumption

Using the resources available on the network to set up, administer, and monitor the quality of service for end-to-end path requests is another indication of how the network is being implemented. One of the best ways to address network performance issues and QoS for various services and applications while having limited visibility to establish an E2E path in inter-ISP networks is to monitor network flow (i.e., bandwidth). Therefore, to analyze path selection strategies, we use Network Resource Consumption (NRC), which is another crucial performance metric, through a condensed bandwidth-hop count product as a rough estimate.

Figures 7c-9c and 8c-10c represent the total network resource consumption while varying the requested bandwidth for a service demand and the number of switches for each network with NSFNET and US Backbone inter-ISP network topologies, respectively. As can be seen from the numbers, the *MHPS* has a noticeably reduced NRC while simultaneously building a QoS-based E2E link that spans many networks. This is due to the fact that, as was mentioned earlier, the *MHPS* searches through all of the available transactions to find the one with the lowest hop count when choosing a path for a service request, whereas the other approaches select the first available and randomly appropriate transaction in order to set up the path more quickly. In Figures 7c and 9c, the *MHPS* approach outperforms the other approaches by at least 70% when the bandwidth demand of a service request is higher than 10.

Moreover, the *MHPS* and *MHPS_BGP* are seen to use similar path selection in intra-ISPs whereas the *MHPS* considers picking an E2E path with a smaller number of hops for the entire network by using all available transactions in the blockchain. Similarly, in Figures 8c and 10c, the *MHPS* has better performance than other approaches as much as 50% when there are more than 6 switches in an intra-network.

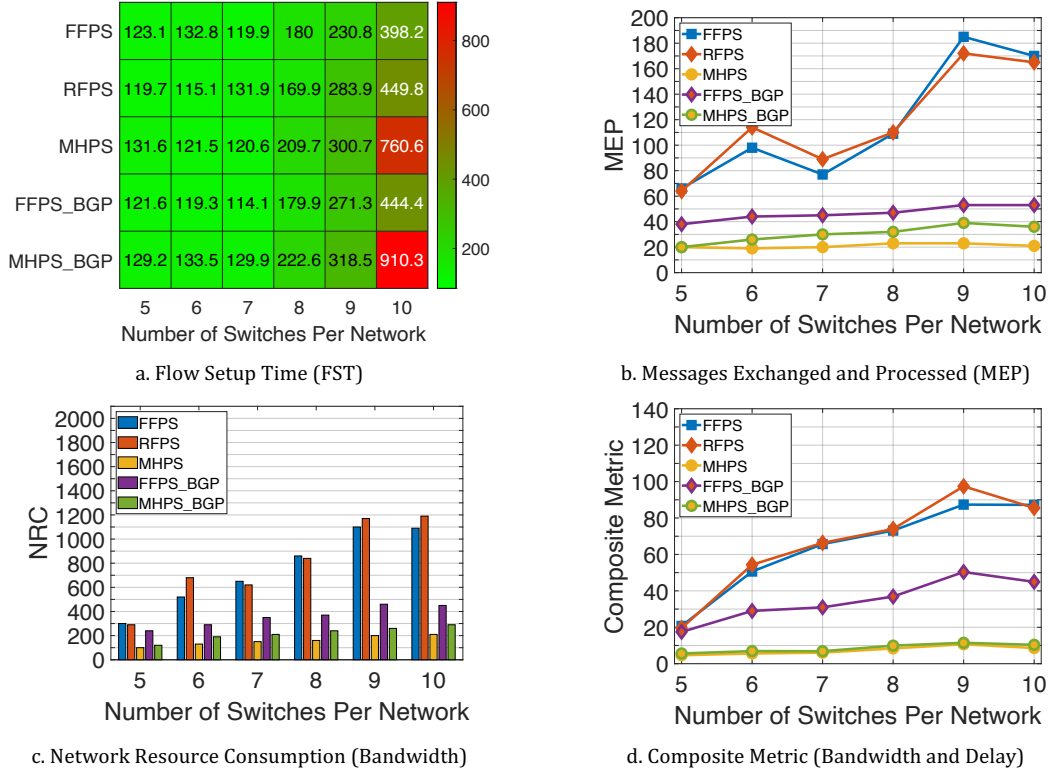


Figure 10. Increasing number of switch(es) per network (USNET ISP Network)

5.4. Composite metric of a path

Another possible indicator of NRC is taking into account the amount of delay that the requests go through while the path is being established. In addition, this will serve to contribute to the general improvement of the user experience's quality. The Composite Metric of a Path (CMP) is our suggestion for the combination of the values for bandwidth and delay that are exhibited by the various paths that have been chosen. The CMP is computed as shown in Eq. (3).

$$C_{ij} = \alpha * \frac{1}{b_{ij}} + \beta * d_{ij}, \quad \forall ij \in L, \quad (3)$$

$$\alpha + \beta = 1, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{R}^+$$

For each link ij in the entire network, C_{ij} is calculated in Eq. (3), where indicates the bandwidth capacity of a physical link, and the delay of a physical link is represented as d_{ij} . To determine the importance factor of QoS parameters, we use α and β values in the range $[0, 1]$ in Eq. (3).

In Figures 7d-9d and 8d-10d, we adjust the α and β values as 0.7 and 0.3, respectively, while also modifying the bandwidth requirement of a request and the number of switches in each network in a manner that is analogous to what was done in the earlier sections. To achieve the goal of minimizing the required composite metric while simultaneously constructing a QoS-based E2E channel over the inter-network, we calculate the composite metric of each link in the network that is capable of meeting the bandwidth requirement of the service request. Similar to minimizing the number of hops in an E2E path, the *MHPS* and *MHPS_BGP* strategies have better performance than other approaches while increasing the bandwidth demands of a service request and the number of switches per network. This is because *MHPS* and *MHPS_BGP* focus on picking an E2E path that satisfies QoS parameters with the minimum number of hops by using all available transactions. Thus, in Figures 7d and 9d, these *MHPS* and *MHPS_BGP* techniques have similar results while the bandwidth demand of a service request is up

to 20. When the bandwidth demand is higher than 20, the *MHPS* approach has slightly better results than *MHPS_BGP* thanks to finding a minimum hop path by considering the entire network. Similarly, in Figures 8d and 10d, the *MHPS* and *MHPS_BGP* approaches outperform other strategies in the CMP metric by at least 100% while increasing the number of switches per network. This is because the *MHPS* and *MHPS_BGP* exploit select a path that has the minimum number of hops with the CMP metric.

6. Conclusion

We previously introduced *QoSChain*, an innovative blockchain-based QoS-enabled inter-network routing system, which was accomplished by combining the potent advantages of Blockchain (BC) technology with Software Defined Networking (SDN). As a further development of *QoSChain*, this work investigates the impact of three path selection strategies defined in [9], and two new Border Gateway Protocol-based inter-ISP routing strategies: *First Feasible Path Selection (FFPS)*, *Random Feasible Path Selection (RFPS)*, *Minimum Hop Path Selection (MHPS)*, *FFPS with BGP at inter-network level (FFPS_BGP)*, and *MHPS with BGP at inter-network level (MHPS_BGP)*. To evaluate the performance of proposed path selection strategies over NSFNET and US Backbone inter-network topologies, we use four different metrics: (i) the required time to set up a flow as Flow Setup Time (FST), (ii) the number of overhead messages of the network communication as Messages Exchanged and Processed (MEP), (iii) required network resource to establish a service request as Network Resource Consumption (NRC), and (iv) a correlation of network resource and latency for enabling an E2E path as Composite Metric of a Path (CMP). The experimental results indicate that the *MHPS* and *MHPS_BGP* approaches have better performance than the other approaches and exploit the effectiveness of reducing hop counts as much as possible to pick a QoS-based E2E path for MEP, NRC, and CMP metrics despite the fact that these results in a predominantly substantially longer initial FST.

Acknowledgment

This work is supported by the Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under Grant No. 120E448.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] M. Karakus and A. Durrezi, "Quality of service (qos) in software defined networking (sdn): a survey," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 80, pp. 200–218, 2017. doi:10.1016/j.jnca.2016.12.019
- [2] A. A. Monrat, O. Schel'en, and K. Andersson, "A survey of blockchain from the perspectives of applications, challenges, and opportunities," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 117 134–117 151, 2019.
- [3] P. Wang, X. Liu, J. Chen, Y. Zhan, and Z. Jin, "QoS-Aware service composition using blockchain-based smart contracts," in *ICSE, ser. ICSE '18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018*, pp. 296–297. doi:10.1145/3183440.3194978
- [4] E. Ak and B. Canberk, "BCDN: A proof of concept model for blockchain-aided CDN orchestration and routing," *Computer Networks*, vol. 161, pp. 162–171, 2019.
- [5] J. Yang, S. He, Y. Xu, L. Chen, and J. Ren, "A Trusted routing scheme using blockchain and reinforcement learning for wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 19, no. 4, pp. 970, 2019.
- [6] M. Saad, A. Anwar, A. Ahmad, H. Alasmay, M. Yuksel, and A. Mohaisen, "RouteChain: towards blockchain-based secure and efficient BGP routing," *2019 IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency (ICBC)*, pp. 210–218, 2019. doi:10.1109/BLOC.2019.8751229
- [7] G. Ramezan and C. Leung, "A Blockchain-Based contractual routing protocol for the internet of things using smart contracts," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, pp. 4029591, 2018. doi:10.1155/2018/4029591
- [8] M. Karakus, E. Guler, and S. Uludag, "QoSChain: provisioning inter-AS QoS in software-defined networks with blockchain," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 18, no. 2, pp. 1706–1717, 2021. doi:10.1109/TNSM.2021.3060476.
- [9] E. Guler, M. Karakus, and S. Uludag, "Evaluating path selection strategies with blockchain-based routing in Multi-Domain SDNs," *2022 International Balkan Conference on Communications and Networking (BalkanCom)*, pp. 6–10, 2022. doi:10.1109/BalkanCom55633.2022.9900749.

- [10] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker, and J. Turner, "Openflow: Enabling innovation in campus networks," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 2, pp. 69–74, 2008. doi:10.1145/1355734.1355746
- [11] ONF, "OpenFlow Switch Specification (1.5.1)." Open Networking Foundation, March 2015. [Online]. Available: <https://www.opennetworking.org/software-defined-standards/specifications>. [Accessed: March 15, 2022].
- [12] W. Wang, D. T. Hoang, P. Hu, Z. Xiong, D. Niyato, P. Wang, Y. Wen, and D. I. Kim, "A survey on consensus mechanisms and mining strategy management in blockchain networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 22328–22370, 2019. doi:10.1109/ACCESS.2019.2896108
- [13] P. Kamboj and S. Pal, "QoS in software defined iot network using blockchain based smart contract: poster abstract," in *SenSys, ser. SenSys'19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery*, pp. 430–431, 2019. doi:10.1145/3356250.3361954
- [14] Y. E. Oktian, E. N. Witanto, S. Kumi, and S. Lee, "ISP network bandwidth management: using blockchain and SDN," *2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pp. 1330–1335, 2019. doi:10.1109/ICTC46691.2019.8939811
- [15] A. Arins, "Blockchain based inter-domain latency aware routing proposal in software defined network," *2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, pp. 1–2, 2018. doi:10.1109/AIEEE.2018.8592203
- [16] M. Karakus and E. Guler, "RoutingChain: a proof-of-concept model for a blockchain-enabled qos-based inter-as routing in SDN," *2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pp. 1–6, 2020. doi:10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9235021
- [17] P. Fernando and J. Wei, "Blockchain-Powered software defined network-enabled networking infrastructure for cloud management," *2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pp. 1–6, 2020. doi:10.1109/CCNC46108.2020.9045378
- [18] P. Podili and K. Kataoka, "TRAQR: Trust aware End-to-End QoS routing in multi-domain SDN using Blockchain," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 182, pp. 103055, 2021.
- [19] Q. Qiao, X. Li, Y. Wang, B. Luo, Y. Ren, and J. Ma, "Credible routing scheme of sdn-based cloud using blockchain," In: *Data Science. ICPCSEE 2019. Communications in Computer and Information Science*, , Cheng, X., Jing, W., Song, X., Lu, Z. (eds), Springer, Singapore vol. 1058, pp 189–206, 2019. doi: 10.1007/978-981-15-0118-0_15
- [20] G. S. Auja, M. Singh, A. Bose, N. Kumar, G. Han, and R. Buyya, "BlockSDN: blockchain-as-a-service for software defined networking in smart city applications," in *IEEE Network*, vol. 34, no. 2, pp. 83–91, 2020. doi:10.1109/MNET.001.1900151
- [21] W. Hou, Z. Ning, L. Guo, and P. Guo, "SDN-based Optimizing Solutions for Multipath Data Transmission Supporting Consortium Blockchains," *2018 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*, pp. 1–5, 2018. doi:10.1109/CITS.2018.8440191.
- [22] IANA "Internet Assigned Numbers Authority." [Online]. Available: <https://www.iana.org>. [Accessed: 2020-05-31].
- [23] M. Caesar and J. Rexford, "Bgp routing policies in isp networks," in *IEEE Network*, vol. 19, no. 6, pp. 5–11, 2005. doi:10.1109/MNET.2005.1541715.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation Of Tribological Properties of Amorphous Thermoplastic Samples With Different Filling Densities Produced By An Additive Manufacturing Method

Gülşah Akıncıoğlu^a, Enes Aslan^{b*}

Submitted: 30.07.2022 Revised : 09.11.2022 Accepted: 03.12.2022 doi:10.30855/gmbd.0705041

ABSTRACT

Keywords: Acrylonitrile butadiene styrene, Wear rate, Hardness, Pin-on disc, Additive Manufacturing

^a Düzce University,
Gümüşova Vocational School,
Dept. of Machine Design
81850 - Gümüşova, Düzce, Türkiye
Orcid: 0000-0002-4768-4935
e mail: gulsahakincioglu@duzce.edu.tr

^{b*} Düzce University,
Gümüşova Vocational School,
Dept. of Machine and Metal
Technologies
81850 - Gümüşova, Düzce, Türkiye
Orcid: 0000-0002-1849-2715
e mail: enesaslan@duzce.edu.tr

*Corresponding author:
enesaslan@duzce.edu.tr

ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate) filament is widely used in outdoor applications thanks to its superior properties. It is exposed to wear due to the environments in which it is used. In this study, the tribological properties of the samples produced at different infill densities (30%, 60%, and 90%) were investigated. Samples were produced using the fused filament fabrication method prior to experiments. Friction tests were carried out on a pin-on disc test device. The friction coefficient, wear rates, hardness, and diameter values of the samples were measured. According to the results obtained, it was understood that there was little change in the tribological properties of the samples according to the infill densities. In addition, 90% infill density samples present higher hardness values and lower wear rates compared to other samples. The study also shows that the fused filament fabrication method is a suitable technique to produce samples from the strong ASA polymer.

Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Farklı Dolgu Yoğunluklarına Sahip Amorftermoplastik Numunelerin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

ÖZ

ASA (Akrilonitril Stiren Akrilat) filament üstün özellikleri sayesinde dış mekân uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanıldığı ortamlardan dolayı aşınmaya maruz kalmaktadır. Bu çalışmada, farklı dolgu yoğunluklarında (%30, %60 ve %90) üretilen numunelerin tribolojik özellikleri araştırılmıştır. Deneyle önce kaynaşmış filament üretim yöntemi kullanılarak numuneler üretilmiştir. Sürtünme testleri, pin-on disk test cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sürtünme katsayısı, aşınma oranları, sertlik ve çap değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, dolgu yoğunluklarına bağlı olarak numunelerin tribolojik özelliklerinde çok az değişiklik olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, %90 dolgu yoğunluklu numuneler, diğer numunelere kıyasla daha yüksek sertlik değerleri ve daha düşük aşınma oranları göstermektedir. Çalışma ayrıca, kaynaşmış filament üretim yönteminin, güçlü ASA polimerinden numune üretmek için uygun bir teknik olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Akrilonitril bütadien stiren, Aşınma oranı, Sertlik, Pin-on disk, Eklemeli İmalat

1. Introduction

Additive manufacturing (AM) is a technology that enables the creation of objects layer by layer and generates complicated parts. Different and complicated designs of the components can be produced using this technology with specific fabrication techniques in an economic and versatile way. The fabrication of prototypes can also be made easily in a few hours instead of weeks with AM techniques. By means of these features, additive manufacturing systems have gained more attraction by academia and industry in recent years. Based on American Society for Testing and Materials (ASTM) AM technologies can be categorized as fused material extrusion, binder and material jetting, powder bed fusion, directed energy deposition, sheet lamination, and VAT polymerization [1]. Fused deposition material is one of the most used techniques by many professional and non-professional users due to its accessibility and cost-effectiveness. Briefly, in this method, polymers are melted and sent through the nozzle to fabricate components according to a specific pattern based on layer by layer approach. Several polymers such as poly-caprolactone [2], [3], polyethylene glycol [4], [5], polylactic acid [6], [7], polycarbonate [8], [9], acrylonitrile butadiene styrene [1], [10], [11], acrylonitrile styrene acrylate [1], [12], [13], and a combination of polymers and different materials [14]–[16] can be used with AM technologies to produce prototypes and real products.

Acrylonitrile styrene acrylate (ASA) is a thermoplastic polymer that has strong weather resistance, mechanical properties, UV irradiation, moisture, heat, and cracking. It has been widely used in prototyping production with fused deposition modeling printers, additionally, it has also a broad usage in the automotive industry due to its lightness and strongest [17].

There are many kinds of research investigating the mechanical [12], [18], [19], thermal, microstructure [18], and recycling properties [20], [21] of ASA polymer in the literature, however, there are a few studies about the tribological investigation of this polymer. Large 3D printed parts was also produced with ASA polymer using large format additive manufacturing process [12]. The parts were produced from neat ASA and carbon fiber-filled ASA polymer to investigate mechanical, thermal and rheological properties in this study. The printability of both materials was achieved with the large format additive system, as a result of the study, thermal conductivity and mechanical properties of carbon fiber loaded ASA increases while the melting flow rate decreases [12]. Guessasma et al. investigated the effect of the microstructure of 3D printed parts with ASA on the mechanical characteristics [18]. They focused on the printing temperature of the polymer to understand its effects on mechanical and thermal performance and specify the optimum printing temperature. In this study samples were produced between 220 °C to 255 °C, result of this, they stated that 250 °C was found as the optimum printing temperature for ASA, while if the temperature is below 240 °C printability problems occur [18]. McFarland and Antunes used ASA polymer to understand suitability as a candidate for hybrid rocket fuel grain in their study, the fused filament fabrication methodology was used to produce 3d printing rocket fuel grain [22]. In this study, ASA, acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polyethylene terephthalate glycol (PETG), polypropylene, nylon, polylactic acid (PLA), and AL (PLA with aluminum particles) were used to produce samples. The regression rate was investigated after small burning test. Based on these experiments, they stated that acrylonitrile styrene acrylate and nylon had the highest regression rate comparing the other polymers [22]. Tribological performance of ASA polymer parts was investigated in the following studies [16], [23]. Martinez et al. has focused on manufacturing processes effects on the tribological and mechanical characteristic of ASA polymer. Wear rate and coefficient of friction values were examined using a pin-on-disc apparatus. They stated that as a result, wear effects on the samples seemed to be less on printed parts with higher layer thickness in this study [23].

Even many studies on mechanical and physical investigations of ASA polymer in the literature there is a lack of studies about the tribological investigation of this polymer. In order to understand wear and friction performance of ASA polymer produced with fused filament fabrication requires more studies. Therefore, this study will be a preliminary study of the tribological properties of ASA polymer.

2. Material and Method

The In this study, ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate) filament with a diameter of 1.75 mm and a density of 1.04 g/mm³ was used. Material properties can be found in Table 1. It is a material that is

widely used thanks to its anti-static properties, resistant to impacts and abrasion, high UV resistance and water-resistant structure. Due to these properties, this filament was preferred in the experiments. ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate) was purchased from Flashforge, it has a white color, print temperature between 240-260°C with a 100°C bed temperature.

Table 1. Material properties used in the study (From Manufacturer)

Material Type	Amorphous thermoplastic (ASA)
Material Density	1.1 g/cm ³
Material Form and Color	Filament - White
Filament Diameter	1.75 mm
Glass Transition Temperature	105 °C
Printing Temperature	240 - 260 °C
Bed Temperature	Around 100 °C
Thermal Conductivity	0.18 W/ m-K

Teira 3D Plastix 250, Turkey brand 3D printer was used in the production of the samples. The 3D printer is given in Figure 1. In the printing process, the table temperature is 105 °C, the nozzle temperature is 255 °C, the infill angle is 45°, the layer height is 0.2 mm, and the number of walls is 1. The samples were produced in a rectangular pattern, cylindrical shape of 10 mm diameter and 20 mm length at 30%, 60% and 90% infill densities. Thus, the effect of the infill density on the tribological properties of the samples was investigated. In order to determine the effect of the infill densities on the measurement accuracy, the diameter values were measured with the help of a micrometer and the hardness values were measured with the Durameter brand Shore D test device immediately after the samples were produced. The hardness device was calibrated using the calibration block of the device before the measurement. 5 measurements were made and the average values were taken. Printing and test parameters were given in Table 2.

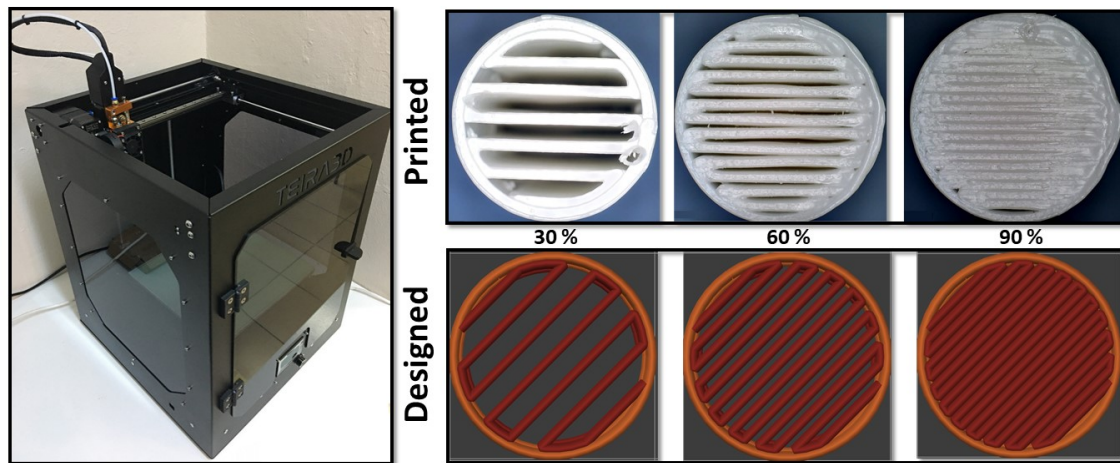


Figure 1. Teira 3D Plastix250 brand printer and test samples used in the experiments

Friction tests were carried out in Turkeyus brand pin-on disc test device according to ASTM G99-17 standard. The pin on disc test device was calibrated before the experiments according to the instruction in the user manual. Pin-on disc test was performed at room temperature (20°C) with rotation speed = 600 rpm, track diameter = 40 mm, speed = 1257 mm/s, distance = 1507920 mm, force = 12 N. In the friction tests, 1.2379 steel disc with 60 HRC hardness was used. Radwag PS 360/C/2 brand balance with 0.001 gr precision was used to determine the weight losses after the wear tests. The weighing device is placed on a stable surface with the help of scales. The device was reset before the measurements. A microscope (Dino Lite AM7915MZT) was used to take images of the worn surface of the samples. Scale settings were calibrated using the image processing software of the microscope. The wear rate was calculated according to Equation 1.

$$\text{Wear rate (spesific)} = \frac{\text{Wear volume loss}}{\text{Sliding distance} \times \text{Applied load} \times \text{Density}} \quad (1)$$

Table 2: Printing and wear test parameters

Printing Parameters	
Nozzle / Bed Temperature	255 °C / 105 °C
Infill Angle / Printing Pattern	45° / Rectangular
Layer Height / Wall Number	0.2 mm / 1
Infill Density	30% / 60% / 90%
Dimensions (Height & Diameter)	Cylinder (20 mm / 10 mm)
Pin-on-disc Test Parameters	
Standard Number	ASTM G99-17
Test Temperature	20 °C
Rotation Speed	600 rpm
Track Diameter	40 mm
Speed	1257 mm/s
Distance	1507920 mm
Load	12 N
Disc type and hardness	1.2379 steel disc / 60 HRC

3. Results and Discussion

The tribological properties of the samples produced at 30%, 60% and 90% infill densities using ASA filaments were investigated. Thanks to the study, it is aimed to use the least material without compromising its tribological properties. The results obtained from the study were evaluated. The hardness, diameter value and wear rate results of the samples are given in Figure 2.

The hardness values of the samples with 30%, 60% and 90% infill densities were measured at 96.6, 94.8 and 98.4 Shore D, respectively (Figure 2a). It is seen that the samples with 90% infill density have the highest hardness value. The lowest hardness value was reached in the samples with 60% infill density. Despite having the same patterns, the change in the infill density affects the hardness of the samples. The difference in hardness values can be attributed to the cooling rate caused by the changing sample mass and the density of the patterns. The diameter values of the samples with 30%, 60% and 90% infill densities, measured immediately after manufacturing, were measured as 9.66, 9.53 and 9.71 mm, respectively (Figure 2b). There is a parallelism between the hardness values of the samples and the diameter values. The hardness differed according to the filling ratios. The hardest samples were observed in samples with 90% fill rate. At the same time, the samples closest to the target diameter value of 10 mm are the samples with 90% fill rate. The highest diameter deviation value was determined in the samples with the lowest hardness and 60% fill rate. This proves that the samples differ according to the amount of material and pattern density. The wear rate values of the samples are given in Figure 2c. The least wear rate was obtained in samples with 90% infill density. As the infill densities increased, a decrease in the wear rates of the samples was obtained.

The average friction coefficients of the ASA samples obtained with the pin-on test device are given in Figure 3. The friction coefficient of the samples with 30% infill density is at the lowest level. Changes in the average friction coefficient values were observed with the change of infill densities. However, it is seen that there is no direct proportionality between the increase in the occupancy rate and the friction coefficient. This can be explained by the fact that friction behavior is a complex phenomenon. The friction coefficient was the highest in the samples with 60% filler density. Fluctuations in the friction coefficient were detected in the first period of the friction test, during the break-in phase. It has been determined that the friction coefficient of the 90% filler density samples with the highest infill density is more stable after the familiarization phase, that is, after the 400 s test period. This can be explained by a greater change in the contact area with particles deposited and adhering between the patterns during testing, when the infill density is low. There may not always be a linear relationship between the filling density and the coefficient of friction. The changes that occur on the surfaces during friction affect the friction coefficient. Some researchers have observed this in their studies. Zhang et al. [24] evaluated the friction coefficients of 25, 50, 75 and 100 fill density PLA samples. They reached the lowest coefficient of friction in samples with 50% filler density. This is due to the friction process on

the surface of the sample with 50 percent filler density. Friction particles uniformly fill the irregular shape of the three-dimensional printing original surface. With this filler, it ensures that the surface smoothness reaches the best condition. They stated that this reduces the friction coefficient on the contact surface of the two friction pairs.

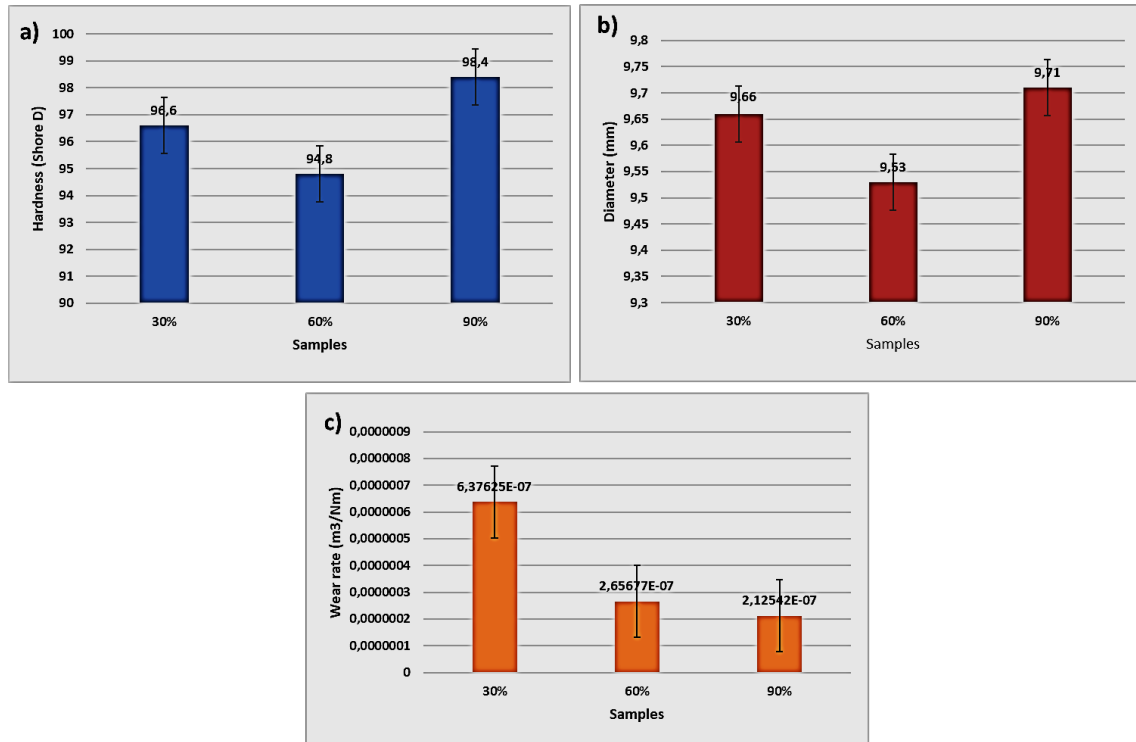


Figure 2. Hardness, Diameter and Wear rates of samples

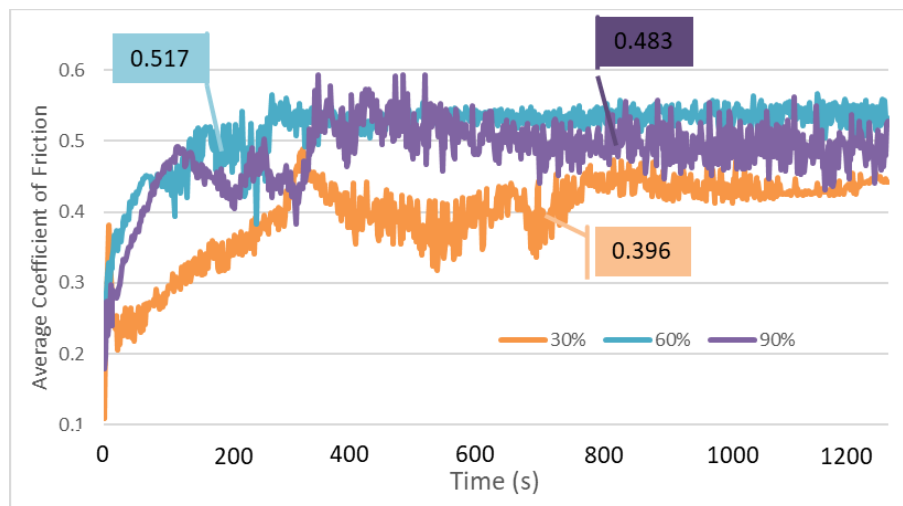


Figure 3. Friction coefficients of samples with 30%, 60% and 90% filler densities

The worn surface images of the samples with 30%, 60% and 90% infill densities are given in Figure 4. As a result of the wear tests, it is seen that there are obvious wear marks on the samples. It is seen that adhesions between patterns are intense in samples with 60% and 90% infill densities. The presence of adhesions and the presence of grooves on the samples indicate that abrasive and adhesion mechanisms are effective. In the sample with 60% filling density, the contact area with the pieces accumulated between the patterns increased, so the wear also increased. This also affected the coefficient of friction. Increasing the contact area and changing the surface quality of the contact surface affect the friction coefficient and wear mechanisms. At 90% infill density, after the friction test, the pattern gaps were filled and a completely flat surface was formed. It can be said that this situation behaved like a 100% filled sample. According to this result, reducing the infill density may be advantageous in some cases in

terms of cost. Different infill densities affect the contact area, temperature during wear, friction coefficient and surface wear behavior [6]. The air spaces between the patterns differ according to the patterns. In addition, during the friction test, the filling of the air spaces with the adhered particles causes the contact surface to change and the heat generated to increase. This also affects the wear behavior of the samples.

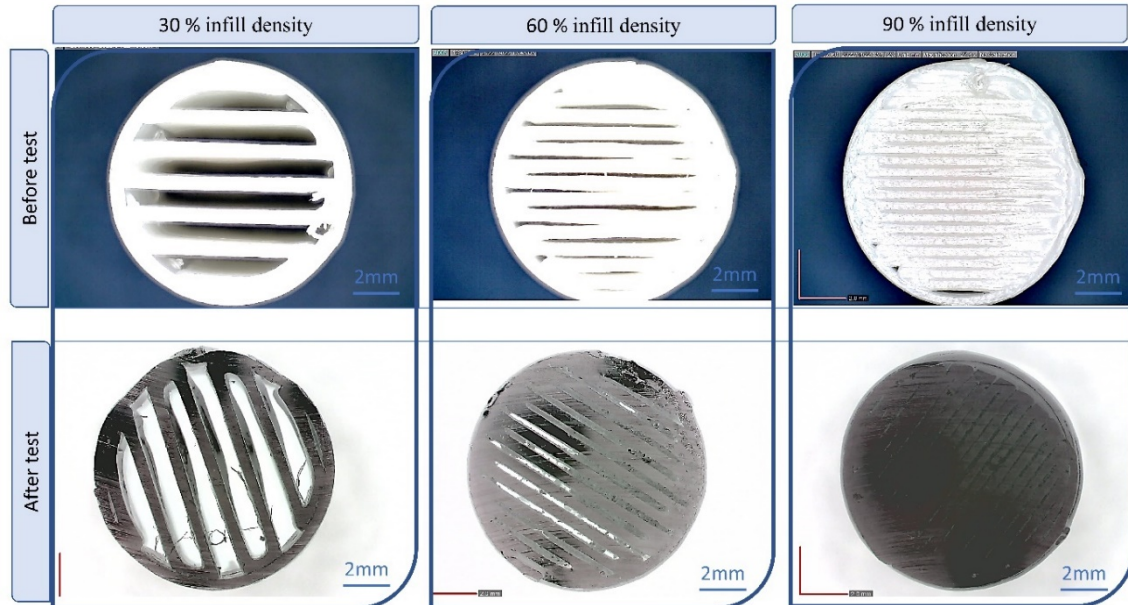


Figure 4. Worn surface images of samples with 30%, 60% and 90% infill densities

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] M. R. Khosravani, A. Zolfagharian, M. Jennings, and T. Reinicke, "Structural performance of 3D-printed composites under various loads and environmental conditions," *Polym. Test.*, vol. 91, pp. 106770, 2020.
- [2] B. Huang *et al.*, "Engineered dual-scale poly (ϵ -caprolactone) scaffolds using 3D printing and rotational electrospinning for bone tissue regeneration," *Addit. Manuf.*, vol. 36, p. 101452, Dec. 2020, doi:10.1016/j.addma.2020.101452
- [3] W. Wang *et al.*, "Morphological, mechanical and biological assessment of PCL/pristine graphene scaffolds for bone regeneration," *Int. J. Bioprinting*, vol. 2, no. 2, pp. 95–104, 2016. doi:10.18063/IJB.2016.02.009
- [4] M. H. Hassan *et al.*, "The Potential of Polyethylene Terephthalate Glycol as Biomaterial for Bone Tissue Engineering," *Polym.*, vol. 12, no. 12, pp. 3045, Dec. 2020, doi:10.3390/POLYM12123045
- [5] N. Vidakis *et al.*, "Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of Polyethylene Terephthalate Glycol over Multiple Recycling Processes," *Mater.*, vol. 14, no. 5, pp. 1162, Mar. 2021, doi:10.3390/MA14051162
- [6] Ş. Şirin, E. Aslan, and G. Akincioglu, "Effects of 3D-printed PLA material with different filling densities on coefficient of friction performance," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 29, no. 1, pp. 157-165, 2023. doi:10.1108/RPJ-03-2022-0081
- [7] A. El Magri, S. Vanaei, M. Shirinbayan, S. Vaudreuil, and A. Tcharkhtchi, "An investigation to study the effect of process parameters on the strength and fatigue behavior of 3d-printed pla-graphene," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 19, pp. 1–16, 2021. doi:10.3390/polym13193218
- [8] M. J. Reich, A. L. Woern, N. G. Tanikella, and J. M. Pearce, "Mechanical Properties and Applications of Recycled Polycarbonate Particle Material Extrusion-Based Additive Manufacturing," *Mater.*, vol. 12, no. 10, pp. 1642, May 2019. doi:10.3390/MA12101642
- [9] K. Bulanda *et al.*, "Polymer Composites Based on Polycarbonate (PC) Applied to Additive Manufacturing Using Melted and Extruded Manufacturing (MEM) Technology," *Polym.*, vol. 13, no. 15, pp. 2455, Jul. 2021. doi:10.3390/POLYM13152455
- [10] V. Kishore *et al.*, "Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components," *Addit. Manuf.*, vol. 14, pp. 7–12, 2017. doi:10.1016/j.addma.2016.11.008

- [11] B. M. Tymrak, M. Kreiger, and J. M. Pearce, "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions," *Mater. Des.*, vol. 58, pp. 242–246, 2014. doi:10.1016/j.matdes.2014.02.038
- [12] D. M. Sánchez, M. de la Mata, F. J. Delgado, V. Casal, and S. I. Molina, "Development of carbon fiber acrylonitrile styrene acrylate composite for large format additive manufacturing," *Mater. Des.*, vol. 191, pp. 108577, 2020. doi:10.1016/j.matdes.2020.108577
- [13] A. Afshar and R. Wood, "Development of weather-resistant 3d printed structures by multi-material additive manufacturing," *J. Compos. Sci.*, vol. 4, no. 3, 2020. doi:10.3390/jcs4030094
- [14] Y. Qi, B. Xiang, W. Tan, and J. Zhang, "Hydrophobic surface modification of TiO₂ nanoparticles for production of acrylonitrile-styrene-acrylate terpolymer/TiO₂ composited cool materials," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 419, pp. 213–223, Oct. 2017. doi:10.1016/j.apsusc.2017.04.234
- [15] B. Huang, C. Vyas, J. J. Byun, M. El-Newehy, Z. Huang, and P. Bártolo, "Aligned multi-walled carbon nanotubes with nanohydroxyapatite in a 3D printed polycaprolactone scaffold stimulates osteogenic differentiation," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 108, pp. 110374, 2020. doi:10.1016/j.msec.2019.11037
- [16] A. Sharma, D. Chhabra, R. Sahdev, A. Kaushik, and U. Punia, "Investigation of wear rate of FDM printed TPU, ASA and multi-material parts using heuristic GANN tool," *Materials Today: Proceedings*. 2022. doi:10.1016/j.matpr.2022.04.015
- [17] A. Patil, A. Patel, and R. Purohit, "An overview of polymeric materials for automotive applications," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 3807–3815, 2017
- [18] S. Guessasma, S. Belhabib, and H. Nouri, "Microstructure, Thermal and Mechanical Behavior of 3D Printed Acrylonitrile Styrene Acrylate," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 304, no. 7, 2019. doi:10.1002/mame.201800793
- [19] A. El Magri, S. E. Ouassil, and S. Vaudreuil, "Effects of printing parameters on the tensile behavior of 3D-printed acrylonitrile styrene acrylate (ASA) material in Z direction," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 62, no. 3, pp. 848–860, 2022. doi:10.1002/pen.25891
- [20] T. K. Meyer, N. G. Tanikella, M. J. Reich, and J. M. Pearce, "Potential of distributed recycling from hybrid manufacturing of 3-D printing and injection molding of stamp sand and acrylonitrile styrene acrylate waste composite," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 25, pp. e00169, Sep. 2020. doi:10.1016/j.susmat.2020.E00169
- [21] D. Jin, T. K. Meyer, S. Chen, K. Ampadu Boateng, J. M. Pearce, and Z. You, "Evaluation of lab performance of stamp sand and acrylonitrile styrene acrylate waste composites without asphalt as road surface materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 338, pp. 127569, Jul. 2022. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.127569
- [22] M. Mcfarland and E. Antunes, "Small-Scale Static Fire Tests of 3D Printing Hybrid Rocket Fuel Grains Produced from Different Materials," *Aerospace 2019*, vol. 6, no. 7, pp. 81, 2019. doi:0.3390/aerospace6070081
- [23] J. M. Vázquez Martínez, D. Piñero Vega, J. Salguero, and M. Batista, "Evaluation of the printing strategies design on the mechanical and tribological response of acrylonitrile styrene acrylate (ASA) additive manufacturing parts," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 28, no. 3, pp. 479–489, 2022. doi:10.1108/RPJ-05-2021-0108.
- [24] P. Zhang, Z. Hu, H. Xie, G.-H. Lee, and C.-H. Lee, "Friction and wear characteristics of polylactic acid (PLA) for 3D printing under reciprocating sliding condition," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 72, no. 4, pp. 533-539. doi:10.1108/ILT-11-2016-0280

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Numerical Investigation of Bird Strike on an Aircraft Wing Leading Edge by Smooth Particle Hydrodynamics Method

Mehmet Furkan Sarıbaş^{a*}, Sami Karadeniz^b,

Submitted: 25.01.2022 Revised: 21.11.2022 Accepted: 30.12.2022 doi:10.30855/gmbd.0705042

ABSTRACT

Keywords: Wing leading edge, SPH method, Bird Strike, Hemispherical-tipped cylinder bird model, Certification criterias

^{a*}Technopark Ankara,
Enginsoft Turkey,
Dept. of Structural Analysis Eng.
06374 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0003-3646-9583
e mail: mfsaribas@gmail.com

^bBaşkent University,
Institute of Science,
Dept. of Mechanical Engineering
06790 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-7373-3120

*Corresponding author:
mfsaribas@gmail.com

There are some criterias set by the national aviation authorities to ensure the safe take-off and landing requirements for an aircraft. According to the statistics, wing structure is one of the structures of an aircraft with the highest risk of bird impact. The purpose of this article is to investigate the robustness of a wing leading edge against a possible bird strike. 3D modeling of wing and bird structure was made using Catia V5 program; these models were then transferred to the LS-DYNA program to create a finite element mesh. SPH method was used to create the particle structure of the bird. Multiple simulation models have been developed for bird and wing structure, and the results from each simulation have been compared. According to the results obtained from this study; the strength of 2xxx aluminum alloys has been found to be insufficient against high-speed bird impacts. However, the use of composite material with a cross-ply sequence for the shell element has positively affected the front spar. In addition, the use of supporting materials such as honeycombs and foam caused to decrease maximum effective stress and protected the front spar from damage.

Bir Uçak Kanadının Hücum Kenarına Kuş Çarpmasının Düzgün Parçacık Hidrodinamiği Yöntemiyle Sayısal İncelenmesi

ÖZ

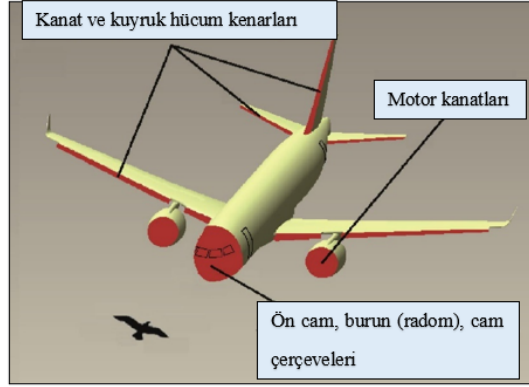
Bir uçağın güvenli kalkış ve iniş gereksinimlerini sağlaması için, ulusal havacılık otoritelerinin belirlemiş olduğu bazı kriterler bulunmaktadır. İstatistiklere göre, kanat yapısı bir uçağın kuş çarpmasına maruz kalma riski en yüksek yapılarından biridir. Bu makalenin amacı bir kanat hücum kenarının olası bir kuş çarpmasına karşı sağlamlığını sayısal olarak ölçmektir. CATIA V5 programı kullanılarak kanat ve kuş yapısının 3 boyutlu modelleri yapılmış; daha sonra bu modeller, sonlu elemanlar ağının oluşturulması için LS-DYNA programına aktarılmıştır. Kuşun partikül yapısının oluşturulmasında SPH yöntemi kullanılmıştır. Kuş ve kanat yapısı için birden fazla simülasyon modeli geliştirilmiştir ve her bir simülasyondan elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; yüksek hızlı kuş çarpması darbelerine karşı 2xxx alüminyum alaşımlarının mukavemetinin yeterli seviyede olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte; kabuk elemanı için çapraz fiber dizilimine sahip kompozit malzeme kullanılması, ön kirişi olumlu yönde etkilemiştir. Ayrıca, bal peteği ve köpük gibi destekleyici malzemelerin kullanılması maksimum etkin gerilmenin düşmesine sebep olmuş ve ön kirişi hasar almaktan korumuştur.

Anahtar Kelimeler: Kanat hücum kenarı, SPH yöntemi, Kuş çarpması, Yarım küre uçlu silindirik kuş modeli, Sertifikasyon kriterleri

1. Giriş (Introduction)

Kuş çarpması olayı, uçuş güvenliği için tehdit oluşturan en önemli unsurlardan biridir ve düşük bir ihtimal de olsa felaketle sonuçlanabilir. Kuş çarpmaları, dünya çapındaki havacılık endüstrileri için her yıl 1 milyar doların üzerinde olduğu tahmin edilen önemli bir ekonomik kayba neden olmaktadır [1].

Şekil 1'de kuş çarpması bakımından en çok risk altında olan uçak yapıları gösterilmiştir.



Şekil 1. Kuş çarpması riski yüksek uçak yapıları (Aircraft structures with highest risk of bird strike) [2]

2019'daki toplam 17358 kuş çarpması rekorunun ardından, 2020'de %33'lük bir azalma ile 11605 kuş çarpması rapor edilmiştir. 2019'a kıyasla kuş çarpmasındaki %33'lük düşüş, COVID-19 pandemisinin etkisiyle havaalanlarındaki uçak hareketliliğinde yaşanan %37'lik azalmadan kaynaklanmıştır. 31 yıllık periyotta (1990-2020), %98.2'si ABD'de meydana gelen toplamda 243064 kuş çarpması vakası bildirilmiştir. 1990'dan 2020'ye kadar, kuş çarpmalarının yüzde 53'ü Temmuz ve Ekim ayları arasında gerçekleşmiştir. Bu aylar kuzey yarımkürede kuşların en fazla göç ettiği aylar olarak bilinmektedir. Kuş çarpması vakalarının %62'sinin gün boyu, %29'unun ise gece gerçekleştiği tespit edilmiştir [3]. Ayrıca yağmurlu, karlı ve sisli havalarda çok az sayıda kuş çarpması vakası gözlenmiştir [3].

1990-2020 yılları arasında 608 kuş türünün uçaklara çarptığı tespit edilmiştir ve bu türlerin 304'ünün hasara neden olduğu bildirilmiştir. 2020 yılında, sivil uçakların çarptığı 315 kuş türü tespit edilmiştir. Güvercinler (%13), yırtıcılar (%12), martılar (%10), kıyı kuşları (%9) ve su kuşları (%5) uçaklarla en çok çarpışan kuş türleri olarak rapor edilmiştir. Bununla birlikte, olası bir çarpışma durumunda; su kuşlarının güvercinlerden 4.2 kat daha fazla, martılar veya yırtıcılardan 1.2 ila 1.5 kat daha fazla hasar verdiği belirlenmiştir [3].

Kuş çarpması vakalarının %95'i, uçaklar 70-280 knot hız aralığında uçarken meydana gelmiştir. Kalkış ve iniş sırasında motorların ürettiği itki kuvveti fazla olduğu için, vakaların %30'u uçak kalkarken, %60'ı uçak piste inerken meydana gelmiştir [3]. Ayrıca bütün çarpışmaların %72'sinin 150 metreden daha az (zemine yakın yerlerde) ve %92'sinin 900 metrenin altında gerçekleştiği rapor edilmiştir. Bu da uçağın kalkış ve iniş evrelerini kritik bir hale getirmiştir. Bu nedenle uçak tasarımında ve uçuşa elverişlilik değerlendirilmesinde, uçağın kalkış ve inişi sırasındaki kuş çarpması direnci dikkate alınmalıdır [4].

Kuş çarpması analizlerinde; ana problemler, şeklin seçimi ile başlar, malzeme özellikleri ve kuş modellemede kullanılacak olan simülasyon yaklaşımı ile devam eder. Katı kuş modeli oluşturmada, yaygın teknik olarak silindir, yarım küre ya da yarım küre uçlu silindir şekilleri kullanılır. Malzeme özellikleri genel olarak suyun özelliklerine benzer olarak seçilir. Simülasyon yaklaşımı, LS-DYNA'da bulunan Lagrange, SPH ya da ALE yaklaşımları ile yapılabilir [5].

Kuş çarpması üzerine geçmişte yapılan çalışmalarda hava aracı yapısal parçalarının kuş çarpmasına karşı dayanıklılığının karakterize edilmesi yönünde kalınlık, malzeme, hız ve kuş şekline bağlı olarak çalışmalar yapılmıştır. 1970 yıllarında başlayan bu çalışmalar, bu yıllardaki nümerik hesaplama olanaklarının yetersiz olması sebebiyle genellikle deneysel çalışmalar olarak kaydedilmiştir [6].

Kahvecioğlu [5] yazdığı raporda 2000'den önce yapılan kuş çarpması çalışmaları için şöyle bir değerlendirmede bulunmuştur:

“Daha önceki yapılan kuş çarpması analizlerinde hedefe kuş tarafından uygulanan yük hedefin tepkisinden bağlantısız hale getirilirdi. Bu simülasyonlarda kuşun bir sonlu eleman modeli oluşturulmaz ve kuşların etkisi bir takım basitleştirici hipotezlerle oluşturulan bir zamana ve konuma bağlı yük olarak yapıya uygulanırdı. Ancak 2000'den sonra yapılan çalışmaların çoğunda kuşun da sonlu eleman modeli oluşturulmuş, kuşun çarpacağı yüzeyde uygunluk sağlanarak çarpılan yapının cevabı ile bağlılık sağlanmıştır.”

Guida ve diğerleri [7] yaptıkları çalışmada SPH yöntemini kullanarak, kuş çarpmasına maruz kalan fiber metal sandviç kanat hücum kenarının dayanıklılığının sayısal bir incelemesini yapmışlardır. Deneysel verilerle simülasyon verileri arasında mükemmel bir uyum elde edilmiştir. Geliştirilen modelin, hücum kenarının son deforme şeklini ve yabancı cismin hücum kenarını delmediğini doğru tahmin ettiği görülmüştür; bu, tasarlanan hücum kenarının iç hücum kenarı yapısını hasardan koruyabilen bir kompozit malzeme olduğunu ve sertifikasyon gereksinimlerini karşılayabildiğini göstermiştir. Sayısal ve deneysel uyum; geliştirilen sonlu elemanlar modellerinin, yapısal tepkileri karakterize eden farklı hasar mekanizmalarını iyi temsil edebildiğini göstermektedir.

Kim ve diğerleri [8] kompozit fan düzenekleri üzerindeki yumuşak darbe hasarını incelemişlerdir. Çalışmalarında statik tek kanatlı ve dönen fan düzeneği üzerindeki çarpma simüle edilmiştir. Kuş çarpması hasarını modellemek için ALE ve SPH teknikleri kullanılmıştır. Geliştirilen “Kuş Darbeli Kompozit Hasar Modelleme Yaklaşımı”nın, kuş çarpması hasarına maruz kalan gelecekteki tahrik sistemlerinin dayanıklılığını değerlendirmek için, kapsamlı bir metodolojinin geliştirilmesine yönelik kritik bir adım olduğu sonucuna varmışlardır.

Hedayati ve Rad [9] bir yaban ördeğinin rijit bir hedefe karşı çarpmasını sayısal olarak incelemişlerdir. İlk olarak, yarım küre uçlu bir silindirin rijit hedefe karşı çarpmasını simüle etmişlerdir. Daha sonra, CT taraması ile gerçek yaban ördeğinden sağlanan verilerin görüntüsü kullanılarak geliştirilmiş bir yaban ördeği SPH modeli oluşturulmuştur. Buradan yola çıkarak gerçek bir yaban ördeğine benzer şekle sahip bir yaban ördeği modeli kullanmanın, kuşun bir yüzeye hangi açıyla çarptığının hedef üzerindeki etkilerinin araştırılmasını mümkün kıldığı çıkarımına varmışlardır. Bunun için hedef üzerinde farklı konumlardaki maksimum basınç noktalarını hesaplamış ve birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, kuşun alt tarafından darbe almanın en zarar verici senaryo olduğunu, kanat tarafından darbe almanın ise en güvenli darbe senaryosu olduğunu göstermiştir. Son olarak, daha gerçekçi bir kuş modeli kullanılarak, gerçek kuş çarpması olaylarına yeterince dayanıklılık gösterecek güvenli ve sağlam bir yapı oluşturulabileceği sonucuna varılmıştır.

Kuş çarpması ile ilgili başka bir çalışma Liu [10] tarafından yapılmıştır. Liu ve diğerleri [10] farklı hızlarda düz bir plaka ile kuş çarpması için deneyler ve simülasyonlar yapmışlardır. Düşük darbe hızlarında tanımlanmış hata sınırına sahip bir elastik-plastik malzeme belirlenmiştir. İzotropik elastik plastik hidrodinamik katı model, ara darbe hızlarında kuş çarpması simülasyonu için en uygun model olmuştur. Son olarak, katı model için Gruneisen EOS tanımına sahip SPH yönteminin, yüksek darbe hızında kuş çarpması simülasyonunu sağladığı görülmüştür.

Heimbs ve diğerleri [11] gelişmiş sayısal yöntemler kullanarak kuş çarpması yüklerine karşı laminer kanat uygulaması için metalik Krueger flebi tasarlanması ve boyutlandırılmasına yönelik bir prosedür sunmuşlardır. Yaklaşım, deneysel veriler kullanılarak modelleme yöntemlerinin adım adım doğrulanmasına dayanmaktadır. Temel modelleme yöntemleri; doğrusal olmayan malzeme modellemesi, kinematik menteşeler modellemesi, tutturulmuş eklemler modellemesi ve hidrodinamik kuş çarpması modellemesi (SPH) olarak ortaya çıktı. Çarpma simülasyonlarından elde edilen son tasarım, gerçek bir tam ölçekli gaz topu çarpma testindeki kuş çarpma direncini doğrulamıştır. Bununla birlikte; malzeme kalınlığı optimizasyonları için üç simülasyon adımını (statik dayanma analizi, çarpma analizi ve artık dayanma analizi) otomatik bir süreçte birleştirerek, nihai tasarımı daha hızlı elde etmek için çok disiplinli optimizasyon açısından daha fazla iyileştirmenin mümkün olduğu belirtilmiştir.

Long [4]'un makalesi, kuş çarpması olaylarında kompozit kanat hücum kenarı yapısının dinamik tepkisini ve hasar modellerini modellemek için sayısal bir yöntem sunmaktadır. Kompozit malzeme için kullanılan kurucu model; malzemenin doğrusal olmamasını, gerinim hızı bağımlılığını ve değişken

hasar modlarını dikkate almıştır. Malzeme hasarını ve eleman silme işlemini hesaba katan kullanıcı alt rutinleri kullanılarak kompozit tabakaların aşamalı hasar süreci simüle edilmiştir. Karşılaştırmalı sonuçlar; modelin, kompozit yapıların deformasyon ve maksimum hasar özelliklerini yeniden üretebildiğini göstermektedir. Ayrıca, yüksek hız etkisi altında kompozit malzeme için gerinim hızı etkisinin ve doğrusal olmamanın dikkate alınmasının gerekli olduğu kanıtlanmıştır. Kanat açıklığı yönüne paralel fiber tabakanın sapmanın azalmasına katkıda bulunabileceği sonucuna varılmıştır. $\pm 45^\circ$ katların oranının yükseltilmesinin, yapının enerji emme kabiliyetini arttırabileceği öngörülmüştür; çünkü $\pm 45^\circ$ katların kesme yüklemesi altındaki hasar dağılım enerjisi, karbon fiber-epoksi kompozit malzemeler için diğer yönlere kıyasla nispeten büyüktür.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Durum denklemi ve kuş modellenmesi (Equation of state and bird modeling)

Kuşu modellemede kullanılan yaygın teknikler; katı bir elipsoid, silindir veya yarım küre uçlu silindir modellerinden oluşmaktadır. Malzeme özellikleri genellikle suyun özelliklerine benzer olacak şekilde seçilir. Tüm modellerde kuş idealize edilmiş bir geometri ile temsil edilir ve malzeme modeli, kuş ortamındaki basınç-yoğunluk ilişkisini tanımlamak için bir durum denklemi (EOS) ile ifade edilir. Genellikle kullanılan malzeme modeli, başlangıçta metallerde balistik çarpışma için geliştirilen elastik-plastik hidrodinamik olarak adlandırılır [12].

Bu çalışmada kuşun malzeme özelliklerini modellemek için LS-DYNA'da bulunan MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO malzeme kartı kullanılmıştır. Bu malzeme kartı, elastik-plastik hidrodinamik bir malzemenin modellenmesine izin verir ve bir durum denklemi (EOS) gerektirir. Elastik bölgede, kesme modülü 2 GPa ve akma gerilimi 0.02 MPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca, plastik sertleştirme modülü değeri 0.001 MPa olarak girilmiştir. Buna ilaveten; daha önce literatürdeki birçok yazar tarafından önerildiği gibi, kuş modeli için 950 kg/m^3 yoğunluk değeri kullanılmıştır. [13]. Tablo 1'de elastik-plastik hidrodinamik kuş malzemesinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Elastik-Plastik hidrodinamik malzeme özellikleri (Elastic-Plastic hydrodynamic material properties)

Yoğunluk (ton/mm^3)	Akma Gerilmesi (MPa)	Kesme Modülü (MPa)	Plastik Sertleştirme Modülü (MPa)
950×10^{-12}	2000	0.02	0.001

Diğer yandan kuş malzemesinin davranışını belirlemek için ise EOS_LINEAR_POLYNOMIAL durum denklemi kullanılmıştır. P basıncını tanımlayan EOS polinomu, kuşun ve çevresindeki havanın modellenmesinde kullanılmaktadır. Kuş modeli için bu EOS polinomu; hidrodinamik, izotropik ve viskoz olmayan bir kurucu yasaya karşılık gelmektedir [14].

Kuş çarpmaları için en yaygın kullanılan durum denklemi, aşağıdaki gibi tanımlanan üçüncü dereceden bir polinomdur [12]:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (2)$$

Burada, μ çarpma sırasındaki yoğluktaki değişimi temsil eder.

Polinomun katsayıları; başlangıç yoğluğu ρ_0 'ya, sudaki ses hızına (c_0) ve deneysel bir sabit olan k 'ya dayanan bir dizi formülle ifade edilir. Formüller şunlardır [13]:

$$\begin{aligned} C_0 &= 0, \text{ başlangıç denge basıncı (ihmal edilir.)} \\ C_1 &= \rho_0 c_0^2 \\ C_2 &= (2k - 1)C_1 \\ C_3 &= (k - 1)(3k - 1) \end{aligned} \quad (3)$$

Bu tezde kullanılacak olan lineer polinomsal durum denklemi katsayı değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu değerler, geçmiş yıllardaki literatür çalışmalarından deneysel olarak elde edilmiştir.

Tablo 2. Lineer polinomsal durum denklemi katsayı değerleri
(Linear polynomial equation of state coefficient values)

C_1	C_2	C_3
2060	6190	10030

Kuş gövdesi, yarım küre uçlu bir silindir olarak modellenmiştir ve FAA kriterlerine göre kuşun kütlesi 1,8 kg olarak belirlenmiştir.

Toplam uzunluğu, çapının 2 katı kadar olan yarım küre uçlu silindirik bir model önerilmiştir. Yarım küre uçlu silindir göz önüne alınarak ve geometrik ilişkiler kullanılarak kuşun çapı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilmektedir [9,14]:

$$D = \sqrt[3]{\frac{8m}{\pi\rho\left(\frac{4}{3}+2\right)}} \quad (4)$$

Burada,

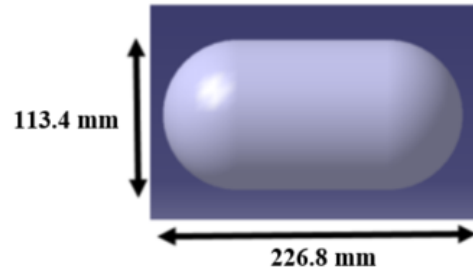
D: Yarım küre uçlu silindirik kuş modelinin çapını,

m: Kuşun kütlesini,

ρ : Kuşun yoğunluğunu ifade etmektedir.

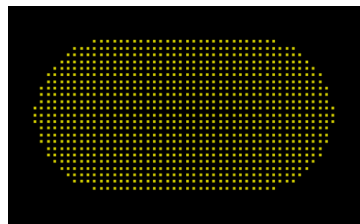
Buradan; $D = 0.1134 \text{ m} = 113.4 \text{ mm}$ elde edilir.

Eşitlik (4)'te yazan değişkenler yerine konularak hesaplanan çap değerine göre elde edilen yarım küre uçlu silindirik kuş modeli Şekil 2'de verilmiştir:



Şekil 2. Yarım küre uçlu silindirik kuş modeli (Hemispherical end cylindrical bird model)

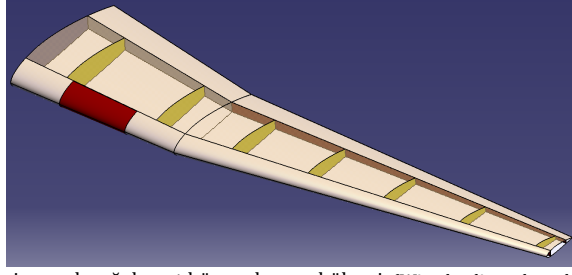
Yarım küre uçlu silindirik kuş modelinin 3 boyutlu modellemesi CATIA V5 programında yapılmıştır. Daha sonra bu kuş modeli, sonlu elemanlar çözüm ağının oluşturulması için LS-DYNA programına aktarılmıştır. Burada kuş modelinin SPH (Düzensiz Parçacık Hidrodinamiği) yöntemi ile sonlu elemanlar çözüm ağı oluşturulmuştur. Şekil 3'te SPH yöntemi ile elde edilen kuş modeli gösterilmiştir.



Şekil 3. SPH kuş modeli (SPH bird model)

2.2. Kanat hücum kenarı yapısı (Wing leading edge structure)

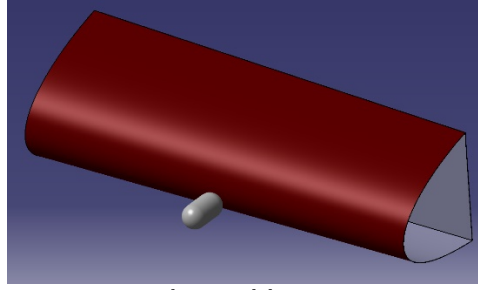
Şekil 4.'te görüldüğü üzere, uçak kanadının gövdeye yakın kısmından bir kanat hücum kenarı kesiti alınmıştır.



Şekil 4. Kuş çarpması analizlerinin yapılacağı kanat hücum kenarı bölgesi (Wing leading edge where bird strike analysis will be made)

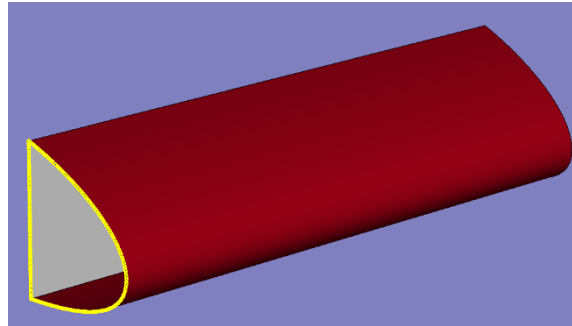
Bütün bunlar göz önünde bulundurulduğunda, analizlerde kök veterden 1500 mm mesafe uzaklıkta, 2000 mm genişliğinde ve 500 mm derinliğinde bir kanat hücum kenarı kesiti alınmıştır (Şekil 5).

Kuş çarpması esnasında kanat içinde yer alan yakıt tankının hasar görmesi halinde, yakıt sızıntısı olacak ve yangın riski doğacaktır. Kuş çarpmasına karşın, kanadın tasarım kriteri yakıt tankının hasar görmemesi olarak belirlenmiştir. Bu nedenle yapılacak olan analizlerde yakıt tankının hemen önünde yer alan ön kiriş (front spar web) üzerinde oluşabilecek hasar ve deformasyonlar dikkate alınmıştır [15].



Şekil 5. Kanat hücum kenarı yapısı ve ön kiriş modeli (Wing leading edge structure and front spar model)

Yapılacak olan analizlerde sınır koşulu olarak, kanat hücum kenarının uçak gövdesine bakan kısmının yer değiştirme ve dönme hareketleri her yönde kısıtlanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Sınır koşulunun uygulanması (Application of the boundary condition)

Bu çalışmada yapılacak olan bütün analizler için; kabuk elemanın et kalınlığı 9 mm, ön kirişin et kalınlığı ise 2,5 mm olarak belirlenmiştir. Kabuğun et kalınlığı belirlenirken Airbus A-320 yolcu uçağı kanadının et kalınlığı ölçüsü dikkate alınmıştır. Ayrıca ön kiriş elemanın malzemesi, bütün analizlerde AA 2024-T3 olarak belirlenmiştir. Kabuk elemanın malzemesi ise analizden analize çeşitlilik göstermiştir. Kabuk elemanın malzemesinin ne olacağı ilerleyen bölümlerde her analiz için belirtilmiştir.

Buna ek olarak, FAA kriterleri dikkate alınarak kuşun çarpma hızı Airbus A-320 yolcu uçağının seyir hızı olan 265 m/s olarak seçilmiştir.

2.3. Alüminyum alaşımdan yapılan kabuk elemanına kuş çarpması (Bird strike on shell element made from AA 2024-T3)

Alüminyum alaşımları; yüksek sertliği, mukavemeti ve hafif olmasından dolayı savunma sanayi,

havacılık sanayi ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle yüksek gerilim altında olan uçak kanat ve gövde yapılarında kullanılırlar [16].

Bu bölümde hücum kenarının kabuk yapısını ve ön kirişi modellemede kullanılacak olan malzeme çeşidi AA 2024-T3'tür. AA 2024-T3'ün akma mukavemeti 345 MPa ve maksimum çekme mukavemeti 483 MPa'dır. Ayrıca, AA 2024-T3 malzemesi 0.33'lük bir Poisson oranına sahiptir.

AA 2024-T3 malzeme için yoğunluk, elastisite modülü ve poisson oranı değerleri Piecewise Linear Plasticity malzeme kartına tanımlanmıştır. Bu değerler Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. AA 2024-T3 malzemenin mekanik özellikleri (Mechanical properties of AA 2024-T3 material)

Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı
2770	73.1	0.33

Gerilim hızı etkisini hesaba katmak için, Cowper-Symonds denklemi modele dahil edilmiştir:

$$\beta = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{p}} \quad (5)$$

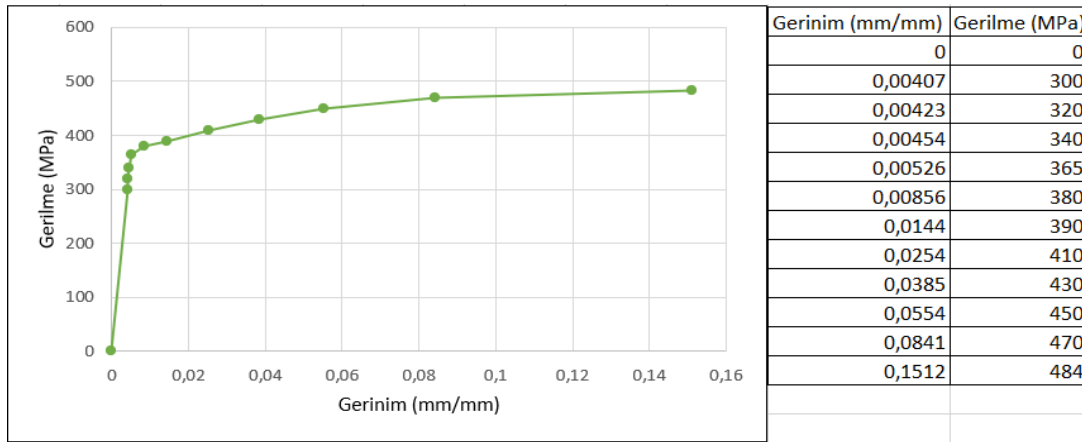
Burada;

C ve p: Cowper-Symonds parametrelerini,

$\dot{\epsilon}$: Gerilim hızını,

β : Dinamik akma gerilmesinin statik akma gerilmesine oranını ifade etmektedir.

AA 2024-T3 için Cowper-Symonds parametreleri olan $C=6500 \text{ s}^{-1}$ ve $p=5$ yine aynı malzeme kartına tanımlanmıştır [2]. Daha sonra DEFINE_CURVE menüsünden malzemeye ait gerilme-gerinim grafiği oluşturulmuştur. Oluşturulan bu grafik (Şekil 7), malzeme kartına LCSS sekmesi aracılığı ile girilmiştir.



Şekil 7. AA 2024-T3 gerilme-gerinim grafiği (AA 2024-T3 stress-strain graph) [6]

2.4. Kompozitten yapılan kabuk elemanına kuş çarpması (Bird Strike on Shell Element Made of Composite)

Kompozit malzemeler, belirli yapısal özellikleri elde etmek için birlikte karıştırılan malzemelerin bir kombinasyonundan oluşur. Kompoziti meydana getiren malzemeler kompozitin içinde tek başına tamamen çözülmez veya birleşmez, ancak bir bütün olarak birlikte hareket ederler. Kompozit malzemenin özellikleri, yapıldığı malzemelerin özelliklerinden daha üstündür. Kompozit malzemeler havacılık yapılarının üretiminde giderek daha önemli hale gelmektedir. Yeni nesil büyük uçakların tüm gövde ve kanat yapıları kompozit malzemeler ile tasarlanmaktadır. Kompozit malzemelerin başlıca avantajları yüksek mukavemetleri, nispeten düşük ağırlıkları ve korozyon direncidir [17].

Fiber, kompozit malzemenin birincil yük taşıma elemanıdır. Kompozit malzeme sadece fiber yönünde güçlü ve serttir. Bir matris fiberleri destekler ve bunları kompozit malzemedeki birbirine bağlar. Matris, uygulanan tüm yükleri fiberlere aktarır, fiberleri konumlarında ve seçilen oryantasyonda tutar, kompozite çevre direncini verir ve bir kompozitin maksimum servis sıcaklığını belirler [17].

Bu çalışma için seçilen kompozit malzeme karbon fiber malzemesidir. Karbon fiberler çok sert ve güçlüdür, cam fiberlerden 3 ila 10 kat daha serttir. Karbon fiber; kirişler, dengeleyiciler, uçuş kontrolleri, birincil gövde ve kanat yapısı gibi yapısal uçak uygulamaları için kullanılır. Avantajları arasında yüksek mukavemeti ve korozyon direnci bulunur.

Kabuk elemanına kompozit malzeme özelliklerini girebilmek için MAT_ENHANCE_COMPOSITE_DAMAGE (MAT_54) malzeme kartı kullanılmıştır. MAT_54 malzeme kartında, Chang-Chang kriterleri tarafından tanımlanan dört kriterden biri karşılanır karşılanmaz hasar meydana gelmektedir. Chang-Chang hasar kriteri hesaplamaları şu şekildedir [18]:

(1) Fiber Yönündeki Çekme Hasarı,

$$\sigma_{bb} > 0 \rightarrow e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_T}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_C}\right), \begin{cases} e_f^2 \geq 1 \rightarrow \text{hasar var} \\ e_f^2 < 1 \rightarrow \text{hasar yok} \end{cases} \quad (6)$$

Hasardan sonra yırtılma varsa; $E_a = E_b = G_{ab} = \nu_{ab} = 0$

(2) Fiber Yönündeki Bası Hasarı,

$$\sigma_{bb} < 0 \rightarrow e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_C}\right)^2, \begin{cases} e_c^2 \geq 1 \rightarrow \text{hasar var} \\ e_c^2 < 1 \rightarrow \text{hasar yok} \end{cases} \quad (7)$$

Hasardan sonra yırtılma varsa; $E_a = \nu_{ab} = \nu_{ba} = 0$

(3) Matris Yönündeki Çekme Hasarı,

$$\sigma_{aa} < 0 \rightarrow e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_C}\right)^2, \begin{cases} e_m^2 \geq 1 \rightarrow \text{hasar var} \\ e_m^2 < 1 \rightarrow \text{hasar yok} \end{cases} \quad (8)$$

Hasardan sonra yırtılma varsa; $E_b = G_{ab} = \nu_{ba} = 0$

(4) Matris Yönündeki Bası Hasarı,

$$e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_C}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{S_C}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_C}\right)^2, \begin{cases} e_d^2 \geq 1 \rightarrow \text{hasar var} \\ e_d^2 < 1 \rightarrow \text{hasar yok} \end{cases} \quad (9)$$

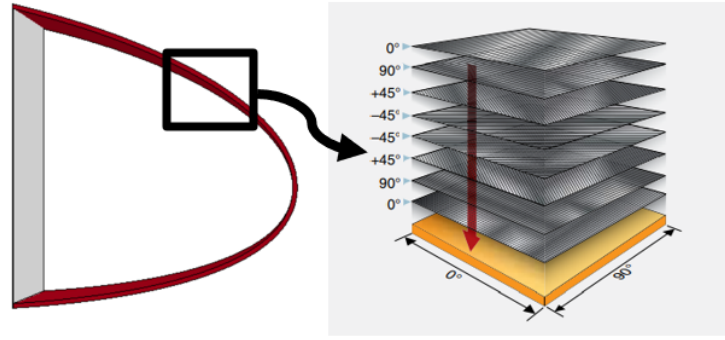
Hasardan sonra yırtılma varsa; $E_b = G_{ab} = \nu_{ba} = 0$

Denklemlerde; e_f , e_c , e_m , ve e_d zaman değişkenleri olarak adlandırılır ve bunlar sırasıyla fiber yönü için gerilim ve bası ile matris yönü için gerilim ve basıyı temsil eden hasar indeksleridir. X_T fiber yönündeki çekme mukavemetidir, X_C fiber yönündeki bası mukavemetidir, Y_T matris yönündeki çekme mukavemetidir, Y_C matris yönündeki bası mukavemetidir ve S_C tek yönlü kompozit katın kayma mukavemetidir. Elastik bölgede a-yönü fiber (eksenel), b-yönü matris (enine) ve ab-yönü kayma için olmak üzere; σ_{aa} , σ_{ab} ve σ_{bb} malzemenin gerilme davranışlarını ifade eder. E_a , E_b , G_{ab} , ν_{ab} ve ν_{ba} değerleri ise yine aynı yönlere elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranlarını ifade eder. Ek olarak, Eşitlik 6'daki β değeri, kayma gerilmesi yük faktörüdür ve kullanıcının fiber yönündeki çekme modunda kayma etkisini açıkça tanımlamasına olanak sağlar [18].

2.4.1 Yarı izotropik fiber dizilimi (Quasi-isotropic fibre sequence)

Yarı-izotropik bir tabakanın katmanları 0° , -45° , 45° ve 90° dizilerinde veya 0° , -60° ve 60° dizilerinde istiflenir. Bu tür kat yönelimi, izotropik bir malzemenin özelliklerini simüle eder. Birçok havacılık kompozit yapısı yarı izotropik malzemelerden yapılmaktadır [17].

Bu bölümde kompozit tabakanın katmanları 0° , 45° , 90° ve -45° dizilerinde istiflenmiştir ve 20 kat atılmıştır. Şekil 8'de kompozit kabuk elemanının yarı izotropik örnek fiber dizilimi gösterilmiştir.

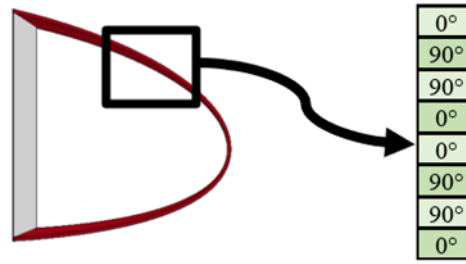


Şekil 8. Kabuk elemanın yarı izotropik fiber dizilimi (Quasi-isotropic fiber sequencing of shell element) [17]

2.4.2 Çapraz fiber dizilimi (Cross-ply fibre sequence)

Çapraz katlı bir laminat, her biri 0° veya 90° 'lik bir elyaf yönelimine sahip ve isteğe bağlı sayıda kat içerir. Bu katlar simetrik veya antisimetrik olabilir [19].

Toplamda 20 kat atılmıştır ve Şekil 9'da kompozit kabuk elemanın çapraz kat örnek fiber dizilimi gösterilmiştir. Analiz sonuçları şu şekildedir:



Şekil 9. Kompozit kabuk elemanın çapraz fiber dizilimi (Cross-ply fibre sequencing of composite shell element)

2.5. Güçlendirici malzemelerin kuş çarpmasına etkisi (The effect of using reinforcing materials on bird strike)

2.5.1 Genleştirilmiş polistiren köpük (EPS foam)

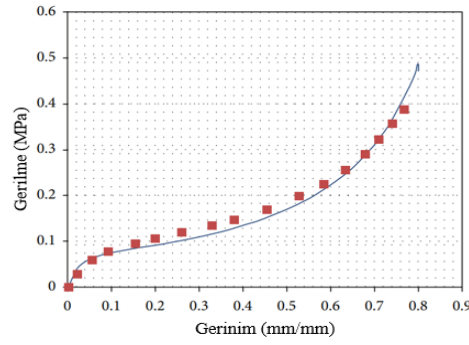
Genleşmiş Polistiren (EPS) sıkıştırılabilir köpük; ambalaj, yapısal dolgu malzemeleri, jeo köpük ürünleri, kişisel koruyucu ekipmanları ve kask gömlekleri dahil olmak üzere enerji emme ve ısı yalıtım uygulamaları için yaygın olarak kullanılan hücreli bir malzemedir. Hafifliği, düşük maliyeti, kolay üretilebilirliği ve en önemlisi iyi enerji emilimi nedeniyle, çeşitli uygulamalarda uzun süredir mühendislik malzemesi olarak kullanılmaktadır [20].

Bu bölümde kabuk elemanın malzemesi için AA 2024-T3 kullanılmıştır. Köpük malzemesinin mekanik özelliklerini tanımlamak için MAT_CRUSHABLE_FOAM malzeme kartı kullanılmıştır. Malzemenin mekanik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Genleşmiş köpük malzemesinin mekanik özellikleri (Mechanical properties of EPS foam material) [21]

Parametreler	Köpük
Yoğunluk, ρ (ton/mm^3)	12.5
Elastisite Modülü, E (GPa)	0.022
Poisson Oranı, ν	0
Sonlandırma Çekme Gerilimi, σ_t (GPa)	0.1
Sönümlenme Katsayısı, ζ	0.5

Ayrıca malzemenin gerilme-gerinim davranışları da yine aynı malzeme kartına tanımlanmıştır. Köpük malzemesi için gerilme-gerinim grafiği Şekil 10'da verilmiştir. Grafikteki kırmızı renkli noktalar literatürden elde edilen sonuçları, mavi renkli grafik ise Topa [21]'nin makalesindeki deneysel sonucu göstermektedir.

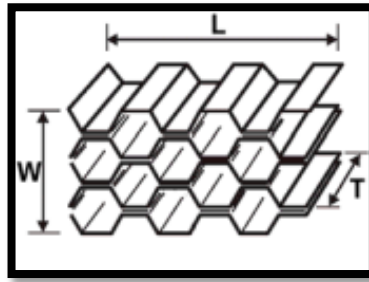


Şekil 10. Köpük malzemesinin gerilme-gerinim grafiği (Stress-strain graph of foam material) [21].

2.5.2 Balpeteği (Honeycomb)

Bal peteği yapısı hücreli bir katıdır. Bir hücreli katı, alanı doldurmak için bir araya getirilmiş katı kenarları veya yüzleri olan hücrelerden oluşur [22]. Bu çalışma alüminyum metalik peteklere odaklanmaktadır. Alüminyum petekler; havacılık, uçak, otomotiv ve deniz mühendisliği gibi çeşitli mühendislik alanlarında dolgu malzemesi olarak değerlendirilmesinin yanında endüstriyel ürünler olarak da kullanılabilir [23].

Petek malzeme yönleri L-yönü (şerit yönü), W-yönü (şerite dik yön) ve T-yönü (kalınlık yönü) olarak tanımlanır. Şekil 11'de bal peteği malzemesinin yönleri gösterilmiştir. Ayrıca, bu bölümde kabuk malzemesi olarak AA 2024-T3 kullanılmıştır.



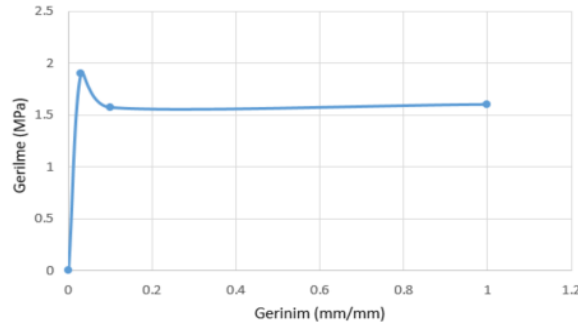
Şekil 11. Bal peteği malzemesinin yönleri (Honeycomb material's directions) [24]

Balpeteği malzemesini tanımlamak için LS-DYNA'da bulunan MAT_MODIFIED_HONEYCOMB malzeme modeli kullanılmıştır. Tablo 5'te balpeteği malzemesinin mekanik özellikleri verilmiştir.

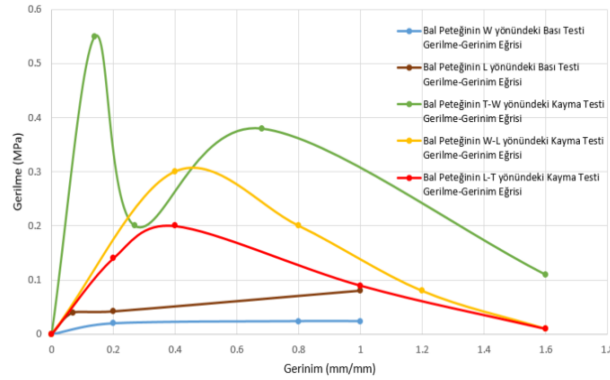
Tablo 5. Balpeteği malzemesinin mekanik özellikleri (Mechanical properties of honeycomb material) [22]

Parametreler	Balpeteği
Yoğunluk, ρ (ton/mm^3)	82.6×10^{-12}
Bası Uygulanmış Petek Malzemesinin Elastik Modülü, E (GPa)	68.95
Poisson Oranı, ν	0
Tamamen Bası Uygulanmış Petek için Akma Gerilimi, σ_y (MPa)	160
Tamamen Bası Uygulanmış Peteğin Bağlı Hacmi, V_f	0.20
Malzeme viskozite katsayısı, μ	0.05
Bası uygulanmamış petek için T yönündeki elastisite modülü, E_{AAU} (MPa)	1020
Bası uygulanmamış petek için W yönündeki elastisite modülü, E_{BBU} (MPa)	340
Bası uygulanmamış petek için L yönündeki elastisite modülü, E_{CCU} (MPa)	340
Bası uygulanmamış petek için T-W yönündeki kesme modülü, G_{ABU} (MPa)	434
Bası uygulanmamış petek için W-L yönündeki kesme modülü, G_{BCU} (MPa)	214
Bası uygulanmamış petek için L-T yönündeki kesme modülü, G_{CAU} (MPa)	434

Daha sonra malzeme modelinde deneysel olarak belirlenen gerilme-gerinim eğrileri malzeme kartına ayrı ayrı tanımlanmıştır. T, W ve L yönlerinde olmak üzere bası testinden elde edilen 3 adet gerilme-gerinim eğrisi bulunmaktadır. Buna ek olarak; T-W, W-L ve L-T yönlerinde olmak üzere kayma testinden elde edilen 3 adet daha gerilme-gerinim eğrisi yer almaktadır. Bu eğrilerin bası uygulanmamış petek için olduğu kabul edilir [22]. Şekil 12 ve Şekil 13'de bu gerilme-gerinim eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 12. Bal Peteğinin T yönündeki Basma Testi Gerilme-Gerinim Eğrisi (Compression Test Stress-Strain Curve of Honeycomb in T-direction) [22]

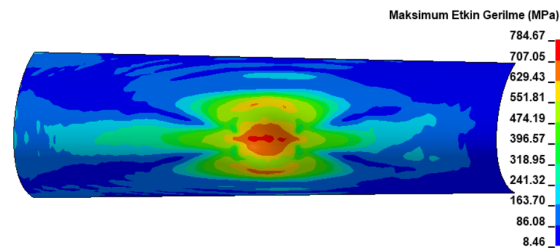


Şekil 13. Bal Peteğinin W ve L yönündeki basma testi ile T-W, W-L ve L-T yönündeki kayma testi gerilme-gerinim eğrileri (Compression test stress-strain curve of honeycomb in W and L direction and shear test stress-strain curve of honeycomb in T-W, W-L, and L-T directions) [22]

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

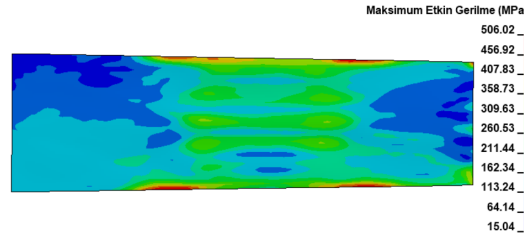
3.1. Alüminyum alaşımdan yapılan kabuk elemanına kuş çarpması (Bird strike on shell element made from AA 2024-T3)

Analiz sonucunda kanat hücum kenarının kabuk yapısında oluşan maksimum Von Mises gerilmesi 784.67 MPa'dır. Kuş çarpmasının olduğu kabuk bölgesindeki gerilme dağılımı Şekil 14'te verilmiştir. AA 2024-T3 malzemesinin maksimum çekme mukavemetinin 483 MPa olduğu düşünüldüğünde, kuşun kabuk yapısının içine etki ettiğini ve bunun sonucunda kabuk yapısının yırtıldığını söylemek mümkündür.



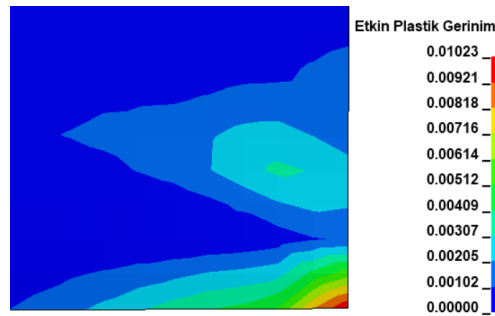
Şekil 14. Kabuk elemanının etkin gerilme dağılımları (Effective stress distributions of shell element)

Şekil 15'te ön kirişte oluşan gerilme durumu gösterilmiştir. Ön kiriş için maksimum Von Mises gerilmesi değeri 506.02 MPa ($t = 2.9$ ms)'dir. Maksimum gerilme, kirişin sol alt kenarında meydana gelmiştir. Ön kirişteki gerilme, AA 20024-T3 malzemesinin maksimum çekme mukavemeti değeri olan 483 MPa'yı geçmiştir. Bunun sonucunda ön kirişin özellikle alt ve üst kenarlarının kalıcı şekil değişikliklerine uğradığını ve yırtıldığını söylemek mümkündür. Kirişin bütünlüğü korunamamış, dolayısıyla tasarım kriteri sağlanmamıştır.



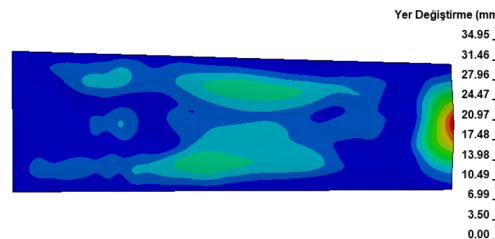
Şekil 15. Ön kiriş için etkin gerilme dağılımları (Effective stress distributions for front spar)

Etkin plastik gerilim değeri malzemenin plastik bölgedeki deformasyon oranını ifade etmektedir. Malzemenin esneme miktarı arttıkça, etkin plastik gerilim de artış gösterir. Şekil 16 incelendiğinde ön kiriş için maksimum etkin plastik gerilim değerinin 0.01023 (%1.023) olduğu görülmektedir.



Şekil 16. Ön kiriş için etkin plastik gerilim dağılımı (Effective plastic strain distribution for front spar)

Son olarak, ön kirişin maksimum yer değiştirme miktarı 34.95 mm olarak hesaplanmıştır. Yer değiştirme miktarı kabuğun sağ kenarının orta noktasında artış göstermiştir (Şekil 17).



Şekil 17. Ön kiriş için yer değiştirme dağılımı (Displacement distribution for front spar)

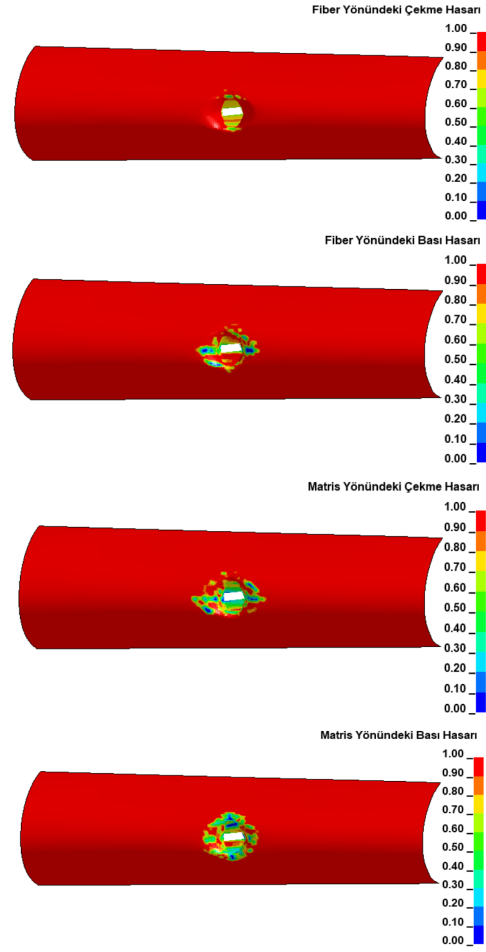
3.2. Kompozitten yapılan kabuk elemanına kuş çarpması (ird strike on the composite shell element)

3.2.1. Yarı izotropik fiber dizilimi (Quasi-isotropic fibre sequence)

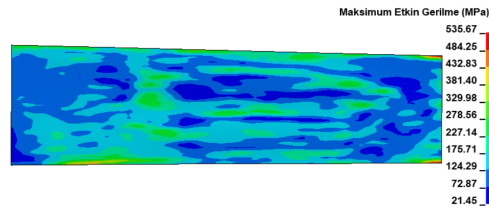
Analiz sonucunda elde edilen bulgular şu şekildedir:

Kabuk elemanı için yapılan analiz sonuçlarına bakıldığında her 4 hasar kriteri (Fiber Yönündeki Çekme Hasarı, Fiber Yönündeki Bası Hasarı, Matris Yönündeki Çekme Hasarı, Matris Yönündeki Bası Hasarı) için de maksimum hasar indeksi değerinin 1'e ulaştığı görülmektedir (Şekil 18). Bu da bize kabuğun kuşun çarpma bölgesinden yırtıldığını veya kopmaya uğradığını kesin olarak göstermektedir. Ayrıca Şekil 18'den yola çıkarak kopma bölgesinin yüzey alanını kabuğun yüzey alanına oranladığımızda, kopmanın küçük bir alanda gerçekleştiğini söylemek mümkündür.

Ön kiriş için maksimum Von Mises gerilmesi değeri 535.67 MPa ($t = 3.5$ ms)'dir. Bu değer, kabuk elemanı AA 2024-T3 malzemeyle yapılan bir önceki analize göre biraz daha yüksek bir değerdir. Bu da bize yarı izotropik dizilime sahip kompozit kabuk elemanının AA 2024-T3 malzemeyle yapılan kabuk elemanından daha dayanıksız olduğunu göstermektedir. Bir önceki analizde olduğu gibi, ön kirişteki gerilme AA 20024-T3 malzemesinin maksimum çekme mukavemeti değeri olan 483 MPa'yı geçmiştir. Maksimum gerilme, kirişin sağ alt kenarında meydana gelmiştir. Şekil 19'a bakıldığında ön kirişin özellikle sağ alt ve üst kenarlarının kalıcı şekil değişikliklerine uğradığı ve yırtıldığı söylenebilir. Dolayısıyla kirişin bütünlüğü korunamamış ve tasarım kriteri sağlanmamıştır.

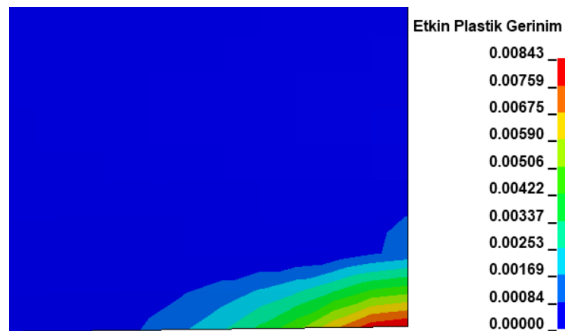


Şekil 18. Kabuk elemanı için etkin hasar indeksleri dağılımı (Effective damage index distribution for shell element)



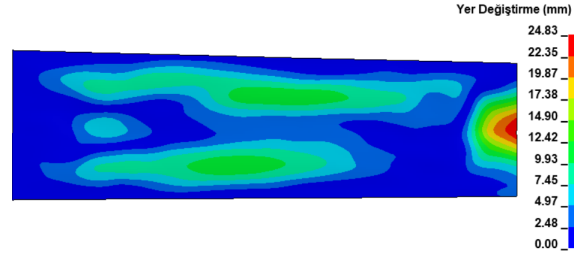
Şekil 19. Ön kiriş için etkin gerilme dağılımları (Effective stress distributions for front spar)

Şekil 20 incelendiğinde maksimum etkin plastik gerilim değerinin 0.00843 (%0.843) olduğu görülmektedir. Bu değer, kabuk elemanı AA 2024-T3 malzemeden yapılan ön kiriş için elde edilen etkin plastik gerilim değerinden daha düşüktür. Yani yarı izotropik dizilime sahip kompozitten yapılan kabuk elemanı, AA 2024-T3'ten yapılan kabuk elemanına göre ön kirişi daha fazla korumuştur, fakat hasarı engelleyememiştir.



Şekil 20. Ön kiriş için etkin plastik gerilim dağılımı (Effective plastic strain distribution for front spar)

Şekil 21'de ön kirişin maksimum yer değiştirmesinin 24.83 mm olduğu görülmektedir. Bu değer, kabuk elemanı AA 2024-T3 malzemeden yapılan ön kiriş için elde edilen yer değiştirme değerinden yaklaşık 10 mm daha düşüktür. Bir önceki plastik gerinim sonucuna benzer şekilde, yarı izotropik dizilime sahip kompozitten yapılan kabuk elemanı ön kirişi AA 2024-T3'ten yapılan kabuk elemanından daha fazla korumuştur, fakat ön kirişin hasar almasını engelleyememiştir. Yer değiştirme miktarı kabuğun sağ kenarının orta noktasında artış göstermiştir.



Şekil 21. Ön kiriş için yer değiştirme dağılımı (Displacement distribution for front spar)

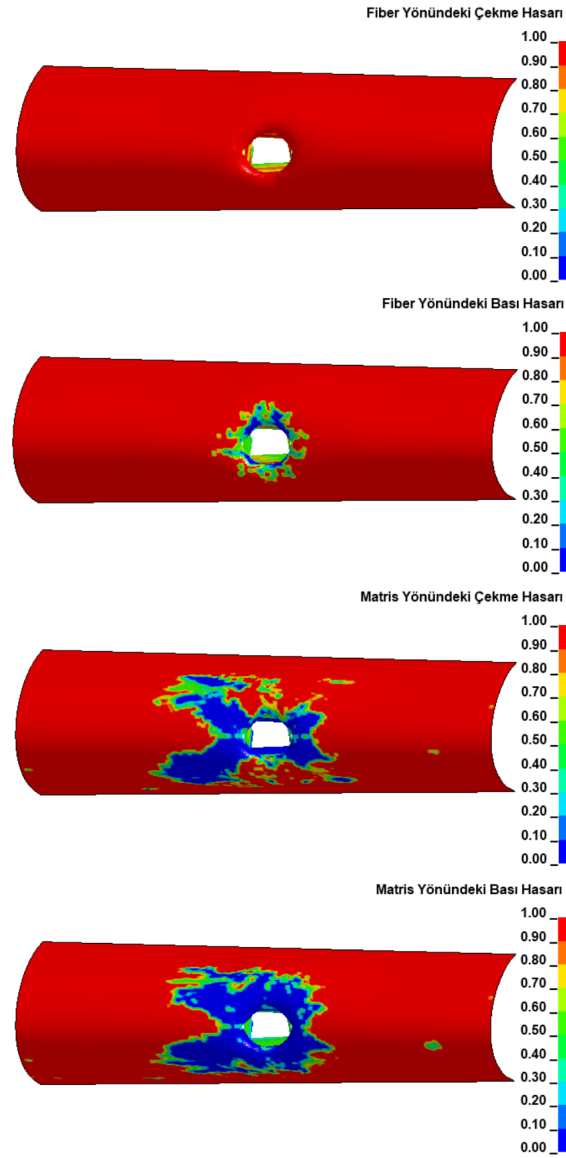
3.2.2. Çapraz fiber dizilimi (Cross-ply fibre sequence)

Yarı izotropik fiber dizilimine sahip kompozit kabuk elemanının analiz sonuçlarına benzer şekilde her 4 hasar kriteri için de maksimum hasar indeksi değerinin 1'e ulaştığı görülmektedir. Bu da bize kabuğun kuşun çarpma bölgesinden kesin olarak yırtıldığını veya kopmaya uğradığını göstermektedir. Ayrıca Şekil 22 incelendiğinde kopma bölgesinin yüzey alanı, yarı izotropik fiber dizilimine sahip kompozit kabuk elemanının analizi sonucunda oluşan kopma bölgesinin yüzey alanından daha büyüktür. Bu sonuç çapraz fiber dizilime sahip kabuk elemanının, yarı izotropik fiber dizilime sahip kabuk elemanına göre daha fazla hasar aldığını göstermektedir.

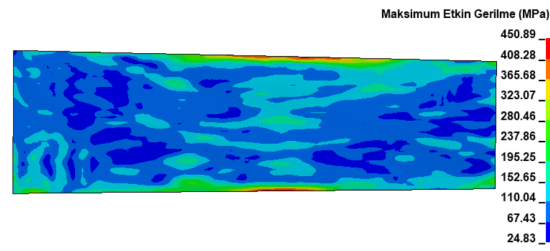
Ön kiriş için maksimum Von Mises gerilmesi değeri 450.89 MPa ($t = 3$ ms)'dir. Bu değer, kabuk elemanları AA 2024-T3 malzemeden yapılan ve yarı izotropik fiber dizilimine sahip kompozitten yapılan hücum kenarları için elde edilen gerilmelerden daha düşüktür. Yani çapraz fiber dizilime sahip kabuk elemanı, diğer iki malzemeden yapılan kabuk elemanlarına göre ön kirişe daha fazla dayanıklılık sağlamıştır. Ön kirişteki gerilme, alüminyum alaşım malzemesinin akma mukavemeti değeri olan 345 MPa'nın üstündedir, fakat maksimum çekme mukavemeti değeri olan 483 MPa'nın altındadır. Maksimum gerilme, kirişin alt kenarında meydana gelmiştir. Ön kirişin özellikle alt kenarının ortasında kalıcı şekil değişiklikleri olduğu söylenebilir (Şekil 23). Ancak kirişin bütünlüğü korunmuş, böylece tasarım kriteri sağlanmıştır.

Şekil 24 incelendiğinde maksimum etkin gerinimin 0.00374 (%0.374) olduğu görülmektedir. Bu değer, kabuk elemanları AA 2024-T3 malzemeden yapılan ve yarı izotropik fiber dizilimine sahip kompozitten yapılan ön kirişler için elde edilen etkin plastik gerinim değerlerinden daha düşüktür. Bir önceki sonuca benzer şekilde çapraz fiber dizilime sahip kabuk elemanının ön kirişe daha fazla mukavemet sağladığı görülmektedir.

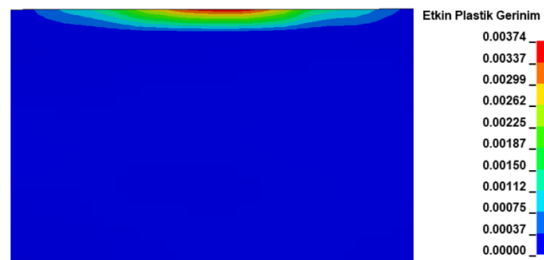
Ön kirişin maksimum yer değiştirmesi 22.22 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer kabuk elemanı AA 2024-T3 malzemeden yapılan ön kirişin yer değiştirme değerinden yaklaşık 12 mm daha düşüktür ve kabuk elemanı yarı izotropik fiber dizilimine sahip kompozitten yapılan ön kirişin yer değiştirme değerinden yaklaşık 2.5 mm daha düşüktür. Önceki 2 analize benzer şekilde, yer değiştirme miktarı kirişin sağ kenarının orta noktasında artış göstermiştir (Şekil 25). Buradan çıkarılacak sonuç ön kirişin bütünlüğünün korunması için kabukta seçilecek en uygun malzemenin çapraz fiber dizilime sahip kompozit eleman olduğudur.



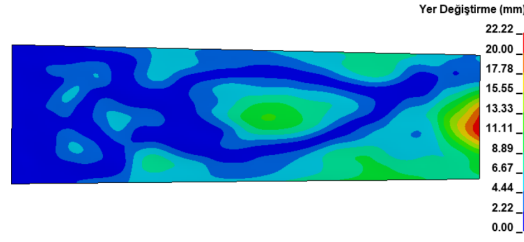
Şekil 22. Kabuk elemanı için etkin hasar indeksleri dağılımı (Effective damage index distribution for shell element)



Şekil 23. Ön kiriş için etkin gerilme dağılımları (Effective stress distributions for front spar)



Şekil 24. Ön Kiriş için Etkin Plastik Gerilim Dağılımı (Effective Plastic Strain Distribution for Front Spar)

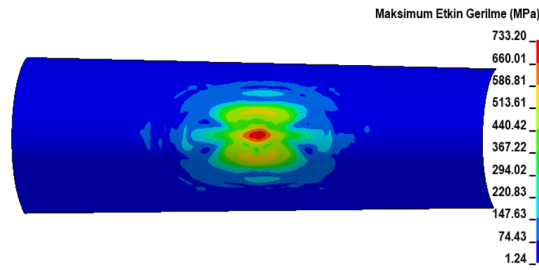


Şekil 25. Ön kiriş için yer değiştirme dağılımı (Displacement distribution for front spar)

3.3 Güçlendirici malzemelerin kuş çarpmasına etkisi (The effect of reinforce materials on bird strike)

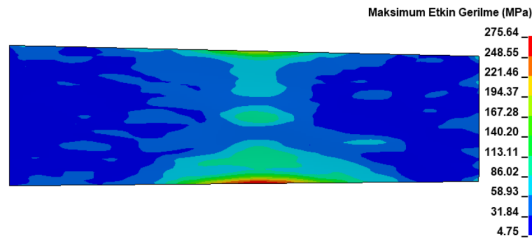
3.3.1 Genleştirilmiş Polistiren Köpük (EPS foam)

Kanat hücum kenarının kabuk yapısında oluşan maksimum Von Misses gerilmesi 733.20 MPa'dır. AA 2024-T3 malzemesinin maksimum çekme mukavemetinin 483 MPa olduğu düşünüldüğünde, kuşun kabuk yapısının içine etki ettiğini ve bunun sonucunda kabuk yapısının yırtıldığını söylemek mümkündür (Şekil 26).



Şekil 26. Kabuk elemanın etkin gerilme dağılımları (Effective stress distributions of shell element)

Ön kiriş için maksimum Von Misses gerilmesi değeri 275.64 MPa ($t = 3.9$ ms)'dir. Bu değer, kabuk elemanları AA 2024-T3'ten ve kompozitlerden yapılan ön kirişlerin maksimum etkin gerilme değerlerinden çok daha düşüktür. Buradan çıkarılacak sonuç, köpüğün destek elemanı olarak kullanılmasının ön kirişte düşük bir gerilme oluşmasına sebep olduğudur. Maksimum gerilme, kirişin alt kenarının ortasında meydana gelmiştir. Ön kirişteki gerilme, AA 2024-T3 malzemesinin akma gerilimi değeri olan 345 MPa'nın altındadır. Bunun sonucunda ön kirişin özellikle alt kenarının ortasının geçici deformasyonlara uğradığı söylenebilir (Şekil 27). Ancak kirişin geneline bakıldığında herhangi bir kopma veya yırtılma söz konusu değildir, böylece tasarım kriteri sağlanmıştır.



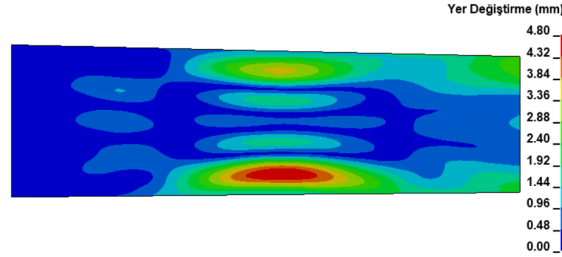
Şekil 27. Ön kiriş için etkin gerilme dağılımları (Effective stress distributions for front spar)

Şekil 28 incelendiğinde ön kirişte etkin plastik gerininin oluşmadığı görülmektedir. Bu sonuca bakarak ön kirişin oldukça makul düzeyde bir elastik deformasyona uğradığı ve önemli bir hasar almadığı söylenebilir.



Şekil 28. Ön kiriş için etkin plastik gerininin dağılımı (Effective plastic strain distribution for front spar)

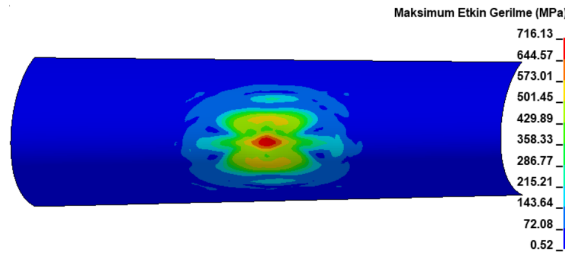
Ön kirişin maksimum yer değiştirme miktarı 4.80 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, kabuk elemanı AA 2024-T3'ten ve kompozitlerden yapılan hücum kenarlarının yer değiştirme değerlerinden çok daha düşüktür. Sonuç olarak destek malzemesi olarak kullanılan köpük; ön kirişteki gerilme, plastik gerinim ve yer değiştirme miktarlarında ciddi azalmalara sebep olmuş ve ön kirişi hasar almaktan korumuştur. Önceki analizlerden farklı olarak, yer değiştirme miktarı kirişin alt bölgesinin ortasında artış göstermiştir (Şekil 29).



Şekil 29. Ön kiriş için yer değiştirme dağılımı (Displacement distribution for front spar)

3.3.2. Balpeteği (Honeycomb)

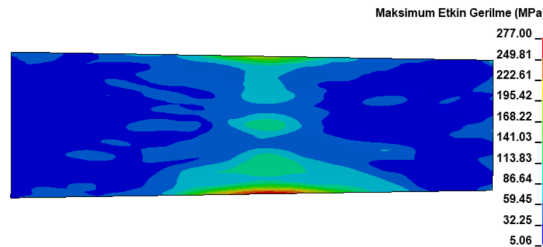
Kanat hücum kenarının kabuk yapısında oluşan maksimum Von Mises gerilmesi 716.13 MPa'dır (Şekil 30). AA 2024-T3 malzemesinin maksimum çekme mukavemetinin 483 MPa olduğu düşünüldüğünde, kuşun kabuk yapısının içine etki ettiğini ve bunun sonucunda kabuk yapısının yırtıldığı söylenebilir.



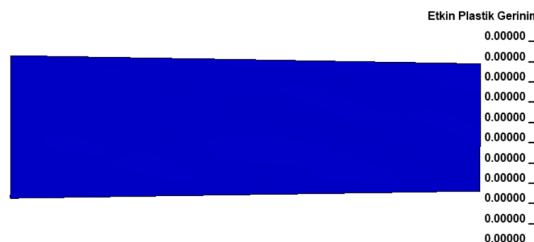
Şekil 30. Kabuk elemanının etkin gerilme dağılımları (Effective stress distributions of shell element)

Ön kiriş için maksimum Von Mises gerilmesi değeri 277.00 MPa ($t = 4$ ms)'dir. Maksimum gerilme, köpükle yapılan analize benzer şekilde kirişin alt kenarının ortasında meydana gelmiştir (Şekil 31). Ön kirişteki gerilme, AA 2024-T3 malzemesinin akma mukavemeti değeri olan 345 MPa'nın altındadır. Bunun sonucunda ön kirişin kalıcı şekil değişikliklerine uğramadığı kesin olarak söylenir. Kirişin bütünlüğü korunmuş ve böylece tasarım koşulu sağlanmıştır.

Şekil 32 incelendiğinde, köpük malzemesiyle yapılan analizlerdeki gibi burada da etkin plastik gerinimin oluşmadığı görülmektedir. Bu sonuca bakarak ön kirişin plastik bölgede herhangi bir deformasyona uğramadığı kesin olarak söylenir.

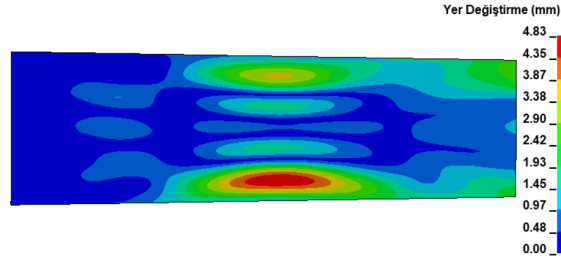


Şekil 31. Ön kiriş için etkin gerilme dağılımları (Effective stress distributions for front spar)



Şekil 32. Ön kiriş için etkin plastik gerinim dağılımı (Effective plastic strain distribution for front spar)

Ön kirişin maksimum yer değiştirme miktarı 4.83 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer köpük malzemesiyle yapılan analizin yer değiştirme miktarıyla neredeyse aynıdır. Yine köpük malzemesiyle yapılan analizin sonuçlarına benzer bir şekilde, yer değiştirme miktarı kabuğun alt bölgesinin ortasında artış göstermiştir (Şekil 33). Sonuç olarak destek malzemesi olarak kullanılan bal peteği; ön kirişteki gerilme, plastik gerinim ve yer değiştirme miktarlarında ciddi azalmalara sebep olmuş ve ön kirişi hasar almaktan korumuştur.



Şekil 33. Ön kiriş için yer değiştirme dağılımı (Displacement distribution for front spar)

Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

Kabuk elemanının AA 2024-T3 malzemedan yapıldığı ve destek elemanının kullanılmadığı analizlerde, ön kiriş hasara uğramıştır. Bu da bize AA 2024-T3 malzemesinin kabuk malzemesi olarak tek başına kullanılamayacağını, kullanılsa bile arkasına mutlaka köpük veya balpeteği gibi destekleyici bir malzemenin eklenmesi gerektiğini göstermektedir.

Yarı izotropik ve çapraz fiber dizilimine sahip kompozitten yapılan kabuk elemanları için, her iki analizde de kuş modeli kabuğu delip geçmiştir. Dolayısıyla kompozit malzeme için kullanılan Chang-Chang hasar kriteri sağlanamamıştır. Ayrıca, kuşun kabukta açtığı deliğin yüzey alanının, çapraz fiber dizilimine sahip kompozit malzemede daha fazla olduğu görülmüştür.

Kabuğu yarı izotropik fiber dizilimine sahip kompozitten yapılan ön kiriş yırtılmaya uğramıştır. Dolayısıyla yarı izotropik fiber dizilimine sahip kompozit malzemeyi kabuk malzemesi olarak kullanmak elverişsizdir.

Bununla bağlantılı olarak kabuğu çapraz fiber dizilimine sahip kompozitten yapılan ön kirişin hasar almadığı görülmüştür. Ayrıca bu analiz için elde edilen maksimum etkin gerilme değeri, kabuğu yarı izotropik fiber dizilimine sahip kompozitle yapılan analizden elde edilen maksimum etkin gerilmeden yaklaşık 85 MPa daha düşüktür. Sonuç olarak, çapraz fiber dizilimine sahip kompozit malzemenin kabuk yapısı için kullanılabilirliği söylenebilir.

Bu 3 analiz için etkin plastik gerinim değerleri karşılaştırıldığında, kabuğu AA 2024-T3'ten yapılan ön kirişin en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Buradan AA 2024-T3'ten yapılan kabuğa sahip ön kirişin plastik bölgede en fazla deformasyona uğradığını söyleyebiliriz. Çapraz katlı fiber kompozitten yapılan kabuk için ise etkin plastik gerinim değerinin en düşük olduğu görülmektedir. Bu da bize çapraz katlı fiber kompozitten yapılan kabuğa sahip ön kirişin plastik bölgede en az deformasyona uğradığını göstermektedir.

Bal peteği ve polistiren köpük gibi destekleyici malzemelerin kullanılması ön kiriş üzerinde beklendiği gibi olumlu bir etki yaratmıştır. Her iki malzemede de etkin plastik gerinim oluşmamıştır. Bu da malzemelerin elastik bölgede kaldıklarını ve plastik bölgeye geçmediklerini göstermektedir. Dolayısıyla her iki malzemede de ön kirişler kesinlikle hasar almamıştır.

Bununla ilgili olarak yer değiştirme değerleri her iki malzeme için de neredeyse aynıdır ve 4.8 mm civarındadır. Maksimum etkin gerilmelere bakıldığında, yine aynı durum söz konusudur ve her iki malzeme için değerler 275-277 MPa civarındadır. Sonuçlara bakılarak; balpeteğinin ve polistiren köpüğün ön kiriş üzerinde hemen hemen aynı derecede etkili oldukları söylenebilir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] L. S. Nizampatnam, "Models and Methods for Bird Strike Load Predictions," Ph.D. dissertation, Wichita State University, Department of Aerospace Engineering, Kansas City, US, 2007.
- [2] O. Dede, "Investigation of Effects of Bird Strike on Wing Leading Edge by Using Explicit Finite Element Method," M.Sc. dissertation, Department of Aerospace Engineering, Middle East Technical Univ., Ankara, Turkey, 2014.
- [3] R. A. Dolbeer, M. J. Begier, P. R. Miller, J. R. Weller, and A. L. Anderson, *Wildlife Strikes to Civil Aircraft in the United States, 1990-2020*. Washington: U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 27 July 2021.
- [4] S. Long, X. Mu, Y. Liu, H. Wang, X. Zhang, and X. Yao, "Failure Modeling of Composite Wing Leading Edge Under Bird Strike," *Composite Structures*, vol. 255, pp. 1-14, 2021, doi:10.1016/j.compstruct.2020.113005
- [5] M. Kahvecioğlu, "Kuş Çarpmasına Maruz Helikopter Kanopilerinin Yapısal Davranışı," M.Sc. dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [6] S. Tan, "Bir Uçak Kanadının Hücum Kenarına Kuş Çarpmasının Sayısal Olarak Modellenmesi ve Analizi," M.Sc. dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [7] M. Guida, F. Marulo, M. Meo and M. Riccio, "Analysis of Bird Impact on a Composite Tailplane Leading Edge," *Applied Composite Materials*, vol. 15, pp. 241-257, 2008, doi:10.1007/s10443-008-9070-6
- [8] M. Kim, A. Zammit, A. Siddens, J. Bayandor, "An Extensive Crashworthiness Methodology for Advanced Propulsion Systems, Part I: Soft Impact Damage Assessment of Composite Fan Stage Assemblies", *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, 4-7 January 2011*. doi:10.1109/5.771073
- [9] R. Hedayati and S. Zisei-Rad, "Effect of Bird Geometry and Orientation On Bird-Target Impact Analysis Using SPH Method," *International Journal of Crashworthiness*, vol. 17, pp. 1-15, 2012. doi:10.1080/13588265.2012.674333.
- [10] J. Liu, Y. Li, X. Gao, "Bird Strike on a Flat Plate: Experiments and Numerical Simulations," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 70, pp. 21-37, 2014. doi:10.1016/j.ijimpeng.2014.03.006
- [11] S. Heimbs, W. Machunze, G. Brand and B. Schlipf, "Bird Strike Analysis for Impact-Resistant Design of Aircraft Wing Krueger Flap," in *2015 SIMULIA Community Conference, 2015, Berlin, Germany* [Online]. Available: Researchgate, <http://www.researchgate.net>. [Accessed: 10 Sept. 2022].
- [12] R. Vijayakumar, K. Gulbarga and R. Ravindranath, "Bird Strike Simulation on Composite Structures," in *41st European Rotorcraft Forum 2015, Rotary Wing R&D Centre, Hindustan Aeronautics Limited, India* [Online]. Available: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net>. [Accessed: 10 Oct. 2022].
- [13] Z. Eren, S. Tataroğlu, D. Balkan and Z. Mecitoğlu, "Modeling of Bird Strike on a Composite Helicopter Rotor Blade," *58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Grapevine, Texas, US, 2017*. doi:10.2514/6.2017-1991
- [14] S. Meguid, R. Mao and T. Ng, "FE analysis of geometry effects of an artificial bird striking an aeroengine fan blade," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, no.6, pp. 487-498, 2008. doi:10.1016/j.ijimpeng.2007.04.008
- [15] T. Kiper, "Kuş Çarpmasının Bir Eğitim Uçağı Kanadı Üzerindeki Etkilerinin Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2015.
- [16] İ. Karaağaç, M. O. Kabakçı, and M. Y. Demirel, "The Experimental Investigation of Annealing Parameters Effects on Al2024-T3 Materials' Formability and Mechanical Properties," *European Journal of Technique (EJT)*, vol. 9, no. 2, pp. 338-346, 2019. doi:10.36222/ejt.648167
- [17] Federal Aviation Administration, *Aviation Maintenance Technician Handbook: Airframe, Volume 1: FAA-H-8083-31A, 2018th ed., Aviation Supplies and Academics, Dec. 2018*.
- [18] B. Wade, P. Feraboli and M. Osborne, *Simulating Laminated Composites Using LS-DYNA Material Model MAT54 Part I: [0] And [90] Ply Single-Element Investigation*, Springfield, Virginia: Federal Aviation Administration, Feb. 2015.
- [19] G. H. Staab, 2nd Ed., *Laminar Composites*. Waltham, MA: Elsevier Science, 2015.
- [20] C. Ling, P. Cardiff, and M. D. Gilchrist, "Mechanical behaviour of EPS foam under combined compression-shear loading," *Materials Today Communications*, vol. 16, pp. 339-352, 2018. doi:10.1016/j.mtcomm.2018.07.001
- [21] Q. H. Shah and A. Topa, "Modeling Large Deformation and Failure of Expanded Polystyrene Crushable Foam Using LS-DYNA," *Modelling and Simulation in Engineering*, pp. 1-7, 2014. doi:10.1155/2014/292647
- [22] J. Hellström and A. Lindblom, "Development of Simulation Model of an ODB," M.Sc. dissertation, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2007.
- [23] A. A. Ashab, D. Ruan, G. Lu and A. A. Bhuiyan, "Finite Element Analysis of Aluminum Honeycombs Subjected to Dynamic Indentation and Compression Loads," *Materials*, vol. 9 no. 3 pp. 162, 2016. doi:10.3390/ma9030162

[24] S. Heimbs, P. Middendorf and M. Maier, "Honeycomb Sandwich Material Modeling for Dynamic Simulations of Aircraft Interior Components," in *9th International LS-DYNA Users Conference, 2006, Dearborn, USA*. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov>. [Accessed: 18 Sept. 2022].

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Gender Detection via Voice Using Artificial Intelligence Algorithms

Serkan Gönen^a, Mehmet Ali Barışkan^b, Gökçe Karacayılmaz^c, Birkan Alhan^d,
Ercan Nurcan Yılmaz^e, Harun Artuner^f

Submitted: 01.09.2022 Revised: 09.12.2022 Accepted: 15.12.2022 doi:10.30855/gmbd.0705043

ABSTRACT

As a result of the developments in science and technology, all our living spaces, from health, education, and trade to our social life, have been moved to the digital environment. With this process, artificial intelligence, which is the ultimate goal of creating systems that think and act like human beings, has started to be used in all areas of our lives. This study focuses on gender determination by using artificial intelligence algorithms on voice data. Thanks to this determination, significant contributions will be made in various fields such as social engineering and cyber security such as fraud, person detection, and advertising investments. In the analysis of the study, R application, a completely open-source, for various artificial intelligence algorithms has been used. In this way, a solution has been provided to take the security as mentioned above measures with low cost instead of high-cost systems and increase the sales figures in areas such as marketing. In the study, supervised learning artificial intelligence algorithms have been examined. The artificial intelligence analysis results of the study have shown that the gender of the person could be determined above % 97 successful rates through the voice data.

Yapay Zekâ Algoritmaları Kullanılarak Sesle Cinsiyet Tespiti

ÖZ

Bilim ve teknolojiadaki gelişmeler sonucunda sağlıktan eğitime, ticaretten sosyal hayatımıza kadar tüm yaşam alanlarımız dijital ortama taşınmıştır. Bu süreçle birlikte insan gibi düşünen ve hareket eden sistemler oluşturmak amacıyla geliştirilmiş yapay zeka kavramı da hayatımızın her alanında kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, yapay zeka algoritmaları kullanılarak ses verilerinin incelenmesiyle cinsiyet belirlemeyi hedefleyen bir algoritma geliştirilmiştir. Cinsiyet tespitine yönelik olarak yapılan Bu tespit sayesinde sosyal mühendislik gibi çeşitli alanlarda ve dolandırıcılık, kişi tespiti, reklam yatırımları gibi siber güvenlik alanlarında önemli katkılar sağlanması hedeflenmiştir. Uygulama geliştirilirken, çeşitli yapay zeka algoritmaları için tamamen açık kaynak kodlu R yazılımı kullanılmıştır. Bu sayede yukarıda bahsedilen güvenlik önlemlerinin yüksek maliyetli sistemler yerine düşük maliyetli önlemler alınmasına ve pazarlama gibi alanlarda satış rakamlarının artırılmasına çözüm aranmıştır. Ayrıca çalışmada yapay zeka algoritması olarak denetimli öğrenme kullanılmıştır. Çalışmanın yapay zeka analiz sonuçları, ses verileri aracılığıyla kişinin cinsiyetinin çok başarılı oranlarda belirlenebildiğini göstermiştir.

Keywords: Artificial Intelligence, Gender Recognition, Cyber Security, Voice Analysis, Supervised Learning

^a Istanbul Gelisim University, Dept. of Computer Engineering, 34310 - Istanbul, Turkey, Orcid: 0000-0002-1417-4461

^b Istanbul Gelisim University, Dept. of Computer Engineering, 34310 - Istanbul, Turkey, Orcid: 000-0002-8039-2686

^c Hacettepe University, Graduate School of Science and Engineering, Dept. of Computer Engineering 06532 - Ankara, Turkey, Orcid: 0000-0001-8529-1721

^d Istanbul Gelisim University, Dept. of Computer Engineering, Istanbul, Turkey, Orcid: 0000-0003-1511-0109

^{e*} Gazi University, Technology Faculty, Dept. of Electrical and Electronic Engineering 06560 - Ankara, Türkiye Orcid: 0000-0001-9859-1600 e mail: enyilmaz@gazi.edu.tr

^f Hacettepe University, Dept. of Computer Engineering, 06532 - Ankara, Turkey Orcid: 0000-0002-6044-379X

*Corresponding author: enyilmaz@gazi.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Yapay Zekâ, Cinsiyet Tanıma, Siber Güvenlik, Ses Analizi, Denetimli Öğrenme

1. Introduction

Advances in science and technology have provided new solutions to the problems that existed in the past. The solution to all kinds of problems, from the field of health to the defense industry, is provided by technology. However, the most important factor in this process is the authentication systems, in which individuals are verified with systems such as fingerprint, voice print, and face recognition [1].

In ecosystems where the security of digitally stored data and the reliability of comparison systems are not given importance in authentication systems, the existence of cyber-attacks and identity theft becomes inevitable. This situation may damage individuals and cause material and moral damage and a loss of prestige and trust for system owners. As a result of the development of technology and the increase in cyberattack environments, the mentioned attack situations have been experienced. As a result, authentication systems have become the most important concept in recent times [2]. In this area, biometric, voice, and identity verification with a primitive question-answer method are performed [3]. Digitization of identity cards, voice signature, and authentication with an electronic signature can be given as examples of these methods. These systems have taken security measures in many countries and institutions using certain conditions and standards. However, considering the cost dimension of these measures, it is seen that their installation and maintenance are difficult and costly [4].

Gender recognition is based on the determination of gender information from people's speech. In other words, it focuses on determining the person from his voice characteristics [5]. Classification of speaker's gender information is one of the most important problems in speech processing. The most basic issue in determining the gender of the person is to produce stable features and to design a good classifier [6]. There are various studies in the literature focusing on gender recognition from voice data. Within the scope of the study, gender determination has been focused on by using the voice parameter, which is a sub-branch of biometric data, which is one of the security analyses. In this way, it will be possible to use the voice to detect gender with high accuracy and prevent spoofing at points where the sound factor is at the forefront, especially in call centers and security control points. In addition to the safety dimension, which is the first target, the gains obtained in the study will also contribute in many different areas such as disease detection via voice [7], use of gender-oriented information in the field of advertising, and e-commerce [8]. The gender of a customer contacting the call center for account transactions in a bank should be confirmed at first. If the customer is a woman but the person speaking is a man, they should be removed directly from the system without the need for identity verification. Considering that the voice signature used in banking systems cannot work properly from time to time, customer security will be ensured at the most basic level by at least determining the gender of the caller by voice analysis. Infiltration and action attempts in disguise in security areas are one of the benefits of working towards physical security. In this context, it will be possible to prevent security attacks in many regions at a low cost. In addition, by making gender determination with sound analysis in marketing activities, it will be possible to receive personalized advertisements, products, and campaigns.

In recent years, with the development of artificial intelligence applications and machine learning, studies in which voice is used in terms of banking, mobile applications, and security have also increased. Especially as fraud detection systems use these types of detection algorithms. The study conducted by Ertam focused on gender determination using the LSTM [9]. They used a small dataset with ten features. On other research, Büyükyılmaz et al., in their study, investigated gender determination using the Multilayer Perceptron (MLP) deep learning model [10]. Li et al. in their study, they stated that combining it with a Support Vector Machine can be successful in detection with a low computational cost [11]. Metze et al. examined different techniques for gender classification over phone applications. They compared the performance of the systems they designed with human listeners [12]. Another of the first studies in this field is the work of Acero and Huang. Researchers stated that they achieved a 30% reduction in error rate in their studies by using the Hidden Markov Model [13].

In addition to these studies, there are also studies that make sound analyzes and disease predictions. In this context, the discovery of tumors in the upper extremity postural and action tremor regions from vocal tremors were discussed in the study by Suppa et al. [14]. While Schultbraucks et al. combined sound analysis with image processing to examine post-traumatic learning [15], Robbotti et al. focused on the detection from sound analysis of those who have recovered from Covid 19 disease and those

who have never been ill [16]. Shimon et al. used voice analyses with questionnaires' to analyze sound quality to detect the effects of Covid19 on human speech [17]. In another area of voice analyses, Al-Dhief, et al. investigated the pathology of sounds using machine learning [18]. Other studies investigated the detection of depressed people through voice analysis [19, 20]. As an important example of sound-based detection, sound analysis has been used to detect Parkinson's disease [21,22, 23].

2. Experimental Environment (Testbed)

Within the scope of the study, open-source technologies have been used to keep the cost at a minimum level. Within the scope of the study, the voice of the person whose gender determination has been requested has been recorded, and then, as a result of the analysis, the target voice recording has been divided into 22 acoustic property values. The trained artificial intelligence model has evaluated these values, and as a result, gender determination has been made. The stages of the experimental environment carried out in the study are depicted in Figure 1.

3. Voice Analysis

In order to make sound analysis in the study, firstly, the sound recording has been made in .WAV format. Secondly, sound analysis has been performed using the WarbleR package of the open-source R application for artificial intelligence model design [19]. Sound-specific acoustic properties have been extracted by using the specan function in order to measure and compare the recorded sound file. As a result of this process, the sound has been converted into 22 acoustic features.

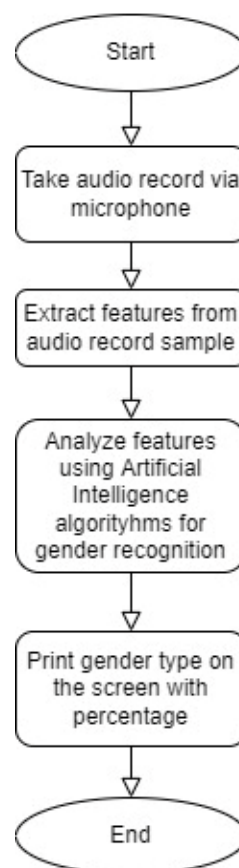


Figure 1. Flowchart of gender analysis over voice

These acoustic properties are given below:

- duration : length of signal
- meanfreq : mean frequency (in kHz)
- sd : standard deviation of frequency

- median : median frequency (in kHz)
- Q25 : first quantile (in kHz)
- Q75 : third quantile (in kHz)
- IQR : interquartile range (in kHz)
- skew : skewness
- kurt : kurtosis
- sp.ent : spectral entropy
- sfm : spectral flatness
- mode : mode frequency
- centroid : frequency centroid
- peakf : peak frequency (frequency with the highest energy)
- meanfun : average of fundamental frequency measured across an acoustic signal
- minfun : minimum fundamental frequency measured across an acoustic signal
- maxfun : maximum fundamental frequency measured across an acoustic signal
- meandom : average of dominant frequency measured across an acoustic signal
- mindom : minimum of dominant frequency measured across an acoustic signal
- maxdom : maximum of dominant frequency measured across an acoustic signal
- dfrange : range of dominant frequency measured across an acoustic signal
- modindx : modulation index

The sound file allocated to the features mentioned above has been instantly read, and gender determination has been carried out through the pre-trained artificial intelligence algorithm on the defining features of the voice.

There are 20 features of this data. The attributes of this dataset are listed in Figure 2. Also has the weight value and ranking of each features. As shown in the Figure 2, the best weight effect is mean fun.

Gradient Boosted Trees - Weights

Attribute	Weight
meanfun	0.263
IQR	0.212
modindx	0.057
minfun	0.050
mindom	0.045
skew	0.045
sfm	0.038
meanfreq	0.038
median	0.032
Q75	0.029
centroid	0.021
sd	0.021
meandom	0.019
dfrange	0.018
maxdom	0.018
maxfun	0.014
Q25	0.012
mode	0.011
sp.ent	0.010

Figure 2. Weights of attributes of the used dataset

The training set has been run as 10 folds and the iteration values determined by using the 10-fold method for the GBM algorithm that has given the best results are shown in Figure 3.

Stochastic Gradient Boosting

2249 samples
 10 predictor
 2 classes: 'female', 'male'

No pre-processing
 Resampling: Cross-validated (10 fold)
 Summary of sample sizes: 2024, 2024, 2025, 2024, 2023, 2025, ...
 Resampling results across tuning parameters:

interaction.depth	n.trees	Accuracy	Kappa
1	50	0.9221961	0.8443858
1	100	0.9466466	0.8932890
1	150	0.9573213	0.9146397
2	50	0.9533232	0.9066398
2	100	0.9657638	0.9315226
2	150	0.9697638	0.9395248
3	50	0.9564304	0.9128549
3	100	0.9670971	0.9341921
3	150	0.9706527	0.9413038

Tuning parameter 'shrinkage' was held constant at a value of 0.1
 Tuning parameter 'n.minobsinnode' was held constant at a value of 10
 Accuracy was used to select the optimal model using the largest value.
 The final values used for the model were n.trees = 150, interaction.depth = 3, shrinkage = 0.1 and n.minobsinnode = 10.

Figure 3. 10 fold (Cross-validated) analysis

Density plots of men and women extracted from 20 of the sound features determined within the scope of the study are depicted in Figure 4.

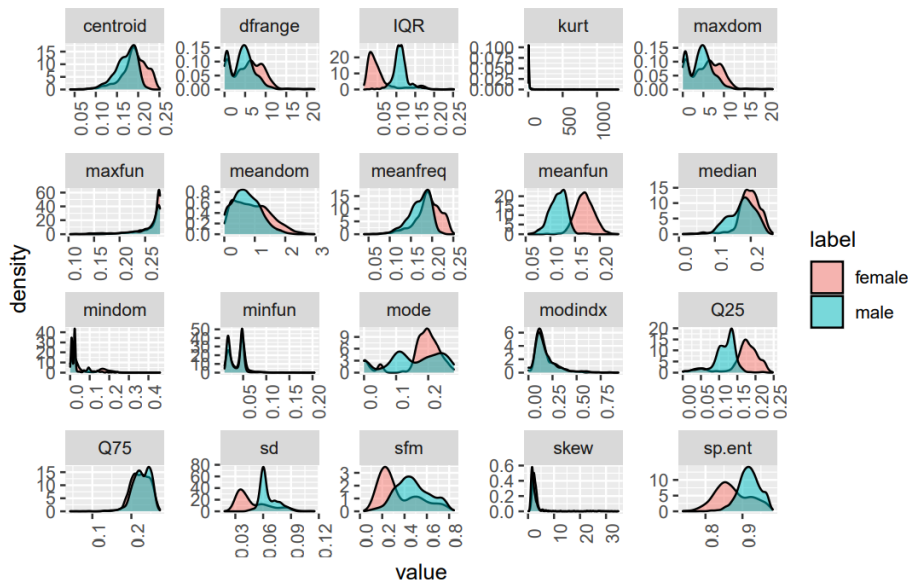


Figure 4. Density plots for male-female values

The confusion matrix of study is given in Figure 5.

Cell Contents

		N	
N / Table Total			

Total Observations in Table: 962

actual gender	predicted gender		Row Total
	female	male	
female	470 0.489	10 0.010	480
male	10 0.010	472 0.491	482
Column Total	480	482	962

Figure 5. Confusion Matrix

4. Artificial Intelligence Model

The analyzed audio file has been sent to the artificial intelligence integration as a dataset divided into 22 acoustic property values. Within the scope of this study, comparisons have been made with eight different algorithms to determine the most performance and most efficient artificial intelligence algorithm. As a test dataset, the universally accepted voice gender dataset on Kaggle [24], which has voice frequencies and acoustic property values, has been used by adding new voice data.

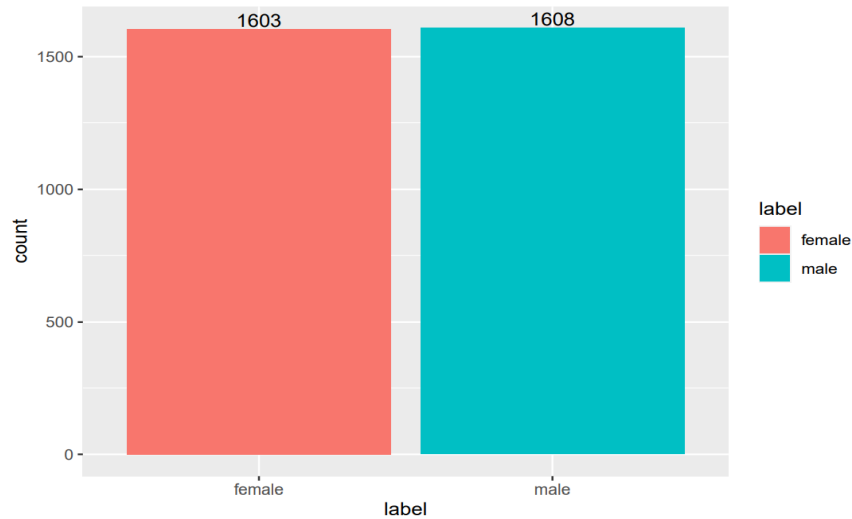


Figure 6. Male-female distribution of the dataset with voice analysis

As depicted in Figure-6, the new dataset created in the study consists of acoustic features of 3211 (1603 female, 1608 male) balanced and gender-labeled voice data. In artificial intelligence algorithms, 70% of values for the train and 30% for the control dataset have been used to reach the most optimum values and result values. Table 1. shows the accuracy values obtained as a result of the study of artificial intelligence algorithms and the metrics of the performance of the algorithms. When these performance metrics are examined together with the accuracy value, it is seen that the Gradient Boosted Model (GBM) gives the best results and this algorithm is used as a model in the study.

Table 1. Artificial intelligence algorithms and success rates used for gender analysis over voice

Algorithm	Accuracy	Classificati on Error	Standard Deviation	AUC	Standard Deviation	F Measure	Standard Deviation	Precision	Standard Deviation	Recall	Standard Deviation
Naive Bayes	87.6%	12.4%	±1.0%	0.945	±0.013	87.7%	±0.9%	87.3%	±2.1%	88.0%	±1.1%
Generalized Linear Model	97.1%	2.9%	±0.6%	0.994	±0.007	97.1%	±0.6%	95.8%	±1.6%	98.5%	±0.6%
Logistic Regression	94.9%	5.1%	±0.7%	0.994	±0.007	95.1%	±0.7%	91.7%	±1.4%	98.7%	±0.9%
Deep Learning	96.1%	3.9%	±0.3%	0.997	±0.004	96.2%	±0.2%	93.4%	±1.0%	99.1%	±0.9%
Decision Tree	96.5%	3.5%	±0.3%	0.987	±0.005	96.5%	±0.3%	97.0%	±1.1%	96.1%	±1.6%
Random Forest	97.2%	2.8%	±0.4%	0.996	±0.004	97.2%	±0.5%	95.4%	±0.9%	98.0%	±1.4%
Gradient Boosted Model	97.9%	2.1%	±0.5%	0.995	±0.003	97.8%	±0.5%	97.4%	±1.2%	98.3%	±1.5%
Support Vector Machine	96.2%	3.8%	±0.5%	0.88	±0.014	96.1%	±0.5%	95.1%	±1.3%	97.8%	±1.4%

The Gradient Boosting Machine (GBM) has given the highest accuracy, F-measure and precision rate among the specified artificial intelligences. So considering these results in the continuation of the study, the GBM algorithm has been used. As a result of running the GBM algorithm, the returned value (female or male) has been transmitted to the relevant user.

5. Discussion

Success statistics are given in studies on sound. Such as Ramadhan et al. examined the random forest algorithm in his study. In the study, classification of the data was carried out using parameter optimization. As a result of the study, it was reported that a success rate of 96.7% was determined [25]. DARPA, according to Ertem, has achieved up to 84% accuracy in resource management documentation. This dataset is from 160 American English-speaking interviews. [26]. Huestegge et al. on the other hand, proposed a new gender-based approach based on a generic voice classifier. The method with 92% success was used to classify the language independently [27]. Moreover, Zorumand et al. In their study, tried to determine the gender of Malay children's voices. They examined the use of formal and fundamental frequencies to discriminate the sex of 7-12-year old children. In their study, they achieved 99.8% performance with MLP [28]. Büyükyılmaz et al. also used a multilayer perceptron deep learning model with 96.8% accuracy to identify gender from voice features [10]. Zvarevashe et al. [29], on the other hand, managed to determine the gender with 97.58% accuracy by using random forest classifier and gradient boosting machine algorithm Livieris, et al, on the other hand used iCST Votting a deviant of CST Votting algorithm with success rate of 98.42%. The ResNet 50 fine-tuned gender data study, by Alnuaim et al., achieved an accuracy of 98.57% [31]. In this study, multiple methods were tried and the most successful one that was the Gradient Boosted Model, with a rate of 97.8%.

6. Conclusion

The design and implementation of voice authentication and gender detection applications is still a developing technology. Still, it has started to take an active role, especially in banking and marketing applications. However, their installation costs are quite high. The study aims to eliminate this high cost by using open source technologies and minimize human-induced errors and/or spoofing attacks by using artificial intelligence algorithms. In this way, an effective solution with low cost has been brought to the cyber security applications and marketing applications that use voice data. The main purpose of this study is to analyze the identity verification and voice signature approach, which is included in specific sectors such as the banking sector, especially for cyber security, with more stable and artificial intelligence analysis and a humanistic approach. In addition, it is aimed to evaluate people as men or women with voice analysis, regardless of disguise, by preventing the abuse of women's / men's rights used in security attacks. In the study, gender determination has been made on the voice data using supervised artificial intelligence algorithms, and an accuracy rate of 97% has been reached with the Gradient Boosting Machine. Thanks to this approach of the study, realizing identity and gender determination with artificial intelligence has been provided in sectors where technology and identity requirements are used.

In the future study, it aims to develop the existing system by combining it with IoT technologies. To make studies to use sound more effectively in physical and cyber security areas such as speaker recognition and emotion analysis.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] A. Ross, S. Banerjee, and A. Chowdhury, "Security in smart cities: A brief review of digital forensic schemes for biometric data," *Pattern Recognition Letters*, vol. 138, pp. 346-354, 2020. doi:10.1016/j.patrec.2020.07.009
- [2] M. A. Ferrag, L. Maglaras, A. Derhab, and H. Janicke, "Authentication schemes for smart mobile devices: Threat models, countermeasures, and open research issues," *Telecommunication Systems*, vol. 73, no. 2, pp. 317-348, 2020. doi:10.1007/s11235-019-00612-5
- [3] A. Abozaid, A. Haggag, H. Kasban, and M. Eltokhy, "Multimodal biometric scheme for human authentication technique based on voice and face recognition fusion." *Multimedia tools and applications*, vol. 78, no. 12, pp. 16345-16361, 2019. doi:10.1007/s11042-018-7012-3
- [4] S. Tanwar, M. S. Obaidat, S. Tyagi, and N. Kumar, "Online signature-based biometric recognition," in *Biometric-based physical and cybersecurity systems: Springer*, pp. 255-285. 2019. doi:10.1007/978-3-319-98734-7_10

- [5] C. Chen, W. Wang, Y. He, & J. Han, "A bilevel framework for joint optimization of session compensation and classification for speaker identification." *Digital Signal Processing*, 89, 104-115, 2019. doi:10.1016/j.dsp.2019.03.008
- [6] Z. Qawaqneh, A. A. Mallouh, & B. D. Barkana, "Deep neural network framework and transformed MFCCs for speaker's age and gender classification," *Knowledge-Based Systems*, vol. 115, pp. 5-14, 2017. doi:10.1016/j.knsys.2016.10.008
- [7] J. Chu, "Artificial intelligence model detects asymptomatic Covid-19 infections through cellphone-recorded coughs," 2020. [Online]. Available: <https://news.mit.edu/2020/covid-19-cough-cellphone-detection> [Access Date: 08.04. 2022].
- [8] P. Gupta, S. Goel, and A. Purwar, "A stacked technique for gender recognition through voice," in *2018 Eleventh International Conference on Contemporary Computing (IC3), Noida, India, 2018*. pp. 1-3. doi:10.1109/IC3.2018.8530520
- [9] F. Ertam, "An effective gender recognition approach using voice data via deeper LSTM networks," *Applied Acoustics*, vol. 156, pp. 351-358, 2019. doi:10.1016/j.apacoust.2019.07.033
- [10] M. Buyukyilmaz and A. O. Cibikdiken, "Voice gender recognition using deep learning," in *2016 International Conference on Modeling, Simulation and Optimization Technologies and Applications (MSOTA2016), Xiamen, China, Dec. 18-19, 2016*, Atlantis Press, 2016. pp. 409-411, 2016. doi: 10.2991/msota-16.2016.90
- [11] M. Li, C. S. Jung, & K. J. Han, "Combining five acoustic level modeling methods for automatic speaker age and gender recognition." In *Eleventh annual conference of the international speech communication association (INTERSPEECH 2010), Makuhari, Chiba, Japan, Sept. 26-30, 2010*, International Speech Communication Association (ISCA), 2010. pp. 2826-2829. doi:10.21437/Interspeech.2010-74
- [12] F. Metzger, J. Ajmera, R. Englert, U. Bub, F. Burkhardt, J. Stegmann, & B. Littel, "Comparison of four approaches to age and gender recognition for telephone applications." In *2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-ICASSP'07, Honolulu, HI, USA, Ap. 15-20, 2007*. vol. 4, pp. IV-1089. doi:10.1109/ICASSP.2007.367263
- [13] A. Acero, & X. Huang, "Speaker and gender normalization for continuous-density hidden Markov models." In *1996 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Conference Proceedings, Atlanta, GA, USA, May, 1996*, IEEE Publication, 1996. vol. 1, pp. 342-345. doi:10.1109/icassp.1996.541102
- [14] A. Suppa et al., "Voice analysis with machine learning: one step closer to an objective diagnosis of essential tremor," *Movement Disorders*, vol. 36, no. 6, pp. 1401-1410, 2021. doi:10.1002/mds.28508
- [15] K. Schultebrucks, V. Yadav, and I. R. Galatzer-Levy, "Utilization of machine learning-based computer vision and voice analysis to derive digital biomarkers of cognitive functioning in trauma survivors," *Digital biomarkers*, vol. 5, no. 1, pp. 16-23, 2021. doi:10.1159/000512394
- [16] C. Robotti et al., "Machine learning-based voice assessment for the detection of positive and recovered COVID-19 patients," *Journal of Voice*, vol. In Press., 2021. doi:10.1016/j.jvoice.2021.11.004
- [17] C. Shimon, G. Shafat, I. Dangoor, and A. Ben-Shitrit, "Artificial intelligence enabled preliminary diagnosis for COVID-19 from voice cues and questionnaires," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 149, no. 2, pp. 1120-1124, 2021. doi:10.1121/10.0003434
- [18] F. T. Al-Dhief et al., "Voice pathology detection and classification by adopting online sequential extreme learning machine," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 77293-77306, 2021. doi:10.1109/ACCESS.2021.3082565
- [19] D. Shin et al., "Detection of minor and major depression through voice as a biomarker using machine learning," *Journal of Clinical Medicine*, vol. 10, no. 14, p. 3046, 2021. doi:10.3390/jcm10143046
- [20] C. W. Espinola, J. C. Gomes, J. M. S. Pereira, and W. P. dos Santos, "Detection of major depressive disorder using vocal acoustic analysis and machine learning - an exploratory study," *Research on Biomedical Engineering*, vol. 37, no. 1, pp. 53-64, 2021. doi:10.1007/s42600-020-00100-9
- [21] J. Carrón, Y. Campos-Roca, M. Madruga, and C. J. Pérez, "A mobile-assisted voice condition analysis system for Parkinson's disease: assessment of usability conditions," *BioMedical Engineering OnLine*, vol. 20, no. 1, pp. 1-24, 2021. doi:10.1186/s12938-021-00951-y
- [22] L. Moro-Velazquez, J. A. Gomez-Garcia, J. D. Arias-Londoño, N. Dehak, and J. I. Godino-Llorente, "Advances in Parkinson's disease detection and assessment using voice and speech: A review of the articulatory and phonatory aspects," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 66, pp. 102418, 2021. doi:10.1016/j.bspc.2021.102418
- [23] E. Majda-Zdancewicz, A. Potulska-Chromik, J. Jakubowski, M. Nojszewska, and A. Kostera-Pruszczyk, "Deep learning vs feature engineering in the assessment of voice signals for diagnosis in Parkinson's disease," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, vol. 69, no. 3, 2021. doi: 10.24425/bpasts.2021.137347.
- [24] K. Becker, "Gender recognition by voice," *Kaggle.com* 2016. [Online] Available: <https://www.kaggle.com/datasets/primaryobjects/voicegender>. [Accessed: 08.04. 2022].
- [25] M. M. Ramadhan, I. S. Sitanggang, F. R. Nasution, & A. Ghifari, "Parameter tuning in random forest based on grid search method for gender classification based on voice frequency," *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*, vol. 10, pp. 625-629, 2017. doi:10.12783/dtcse/cece2017/14611

- [26] F. Ertam, "An effective gender recognition approach using voice data via deeper LSTM networks," *Applied Acoustics*, vol.156, pp. 351-358. 2019. doi:10.1016/j.apacoust.2019.07.033
- [27] S. M. Huestegge and T. Raettig, "Crossing Gender Borders: Bidirectional Dynamic Interaction Between Face-Based and Voice-Based Gender Categorization," *JVoice*, vol. 34, no. 3 pp. 487 -487, 2018. doi:10.1016/j.jvoice.2018.09.020
- [28] A. Zourmand, H. N. Ting and S. M. Mirhassani, "Gender classification in children based on speech characteristics: using fundamental and formant frequencies of Malay vowels," *J Voice*, vol. 27 no. 2 pp. 201-209, 2013. doi:10.1016/j.jvoice.2012.12.006.
- [29] K. Zvarevashe and O. O. Olugbara, "Gender Voice Recognition Using Random Forest Recursive Feature Elimination with Gradient Boosting Machines," *In Proceedings of the 2018 International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, pp. 1-6, 6-7 August 2018, Durban, South Africa. doi: 10.1109/ICABCD.2018.8465466
- [30] I. E. Livieris, E. Pintelas, P. Pintelas, "Gender Recognition by Voice Using an Improved Self-Labeled Algorithm," *Mach. Learn. Knowl. Extr.*, vol. 1, no. 1, pp. 492-503, 2019. doi:10.3390/make1010030
- [31] A. A. Alnuaim, M. Zakariah, C. Shashidhar, W A. Hatamleh, H. Tarazi, P. K. Shukla, and R. Ratna, "Speaker Gender Recognition Based on Deep Neural Networks and ResNet50," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, pp. 1-13, 2022. doi:10.1155/2022/4444388

* Bu makale Uluslararası Mühendislikte Yapay Zeka ve Uygulamalı Matematik Konferansı - ICAIAME 2022 isimli konferansta sunulmuş bildirinin genişletilmiş halidir.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Effect of Hot Forming Process on 34CrNiMo6 Material on Dislocation Density

Gözde Altuntaş^{a*}, Bülent Bostan^a

Submitted: 31.10.2022 Revised: 29.11.2022 Accepted: 29.12.2022 doi:10.30855/gmbd.0705044

ABSTRACT

Keywords: 34CrNiMo6, Forging, Dislocation density

^{a*}Gazi University,
 Technology Faculty,
 Dept. of Metallurgy and Materials
 Engineering
 06560 - Ankara, Türkiye
 Orcid: 0000-0003-4504-0850
 e mail: gozdealtuntas@gazi.edu.tr

^aGazi University,
 Technology Faculty,
 Dept. of Metallurgy and Materials
 Engineering
 06560 - Ankara, Türkiye
 Orcid: 0000-0002-6114-875X

*Corresponding author:
 gozdealtuntas@gazi.edu.tr

In this study, commercially purchased 34CrNiMo6 material, also known as 4340 steel, was shaped by hot forging. The microstructure differences of the samples cut for metallographic processes before and after forging were observed by scanning electron microscope (SEM). Element ratios in the different regions formed were analyzed by energy dispersive X-ray spectrometry (EDS). X-Ray Diffraction (XRD) analysis was performed to find the materials dislocation density and crystallinity size. With XRD analysis, the lattice strain created by the forging process in the material was also calculated and compared with the raw material. The mechanical effects of the forging process on the material were examined and the changes in the material with the formation of dynamic recrystallization were investigated. At the same time, the microhardness values were measured according to HV0.5 and the relationship with the dislocation density was examined. As a result of the analysis, the dislocation density of the raw material decreased by 50% on average after forging, and the crystallite size increased by 20% on average. It was observed that the lattice strain value of the material decreased by about 30% after forging. The relationship between the change of these values and the hardness values was investigated.

34CrNiMo6 Malzemesine Uygulanan Sıcak Şekillendirme İşleminin Dislokasyon Yoğunluğuna Etkisi

ÖZ

Bu çalışmada ticari olarak satın alınan 34CrNiMo6 malzemesi diğer adıyla 4340 çeliği sıcak dövme ile şekillendirilmiştir. Dövme işleminden önce ve sonra metalografik işlemler için kesilen numunelerin mikro yapıda oluşan farklılıkları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Oluşan farklı bölgelerdeki element oranları, enerji dağıtıcı X-ışını spektrometrisi (EDS) ile analiz edilmiştir. Numunelerde ki dislokasyon yoğunluğunu ve kristalite boyutunu bulabilmek için X-ışını kırınım (XRD) analizi yapılmıştır. XRD analiziyle dövme işleminin malzemede oluşturduğu kafes gerinimi de hesaplanarak ana malzemeyle karşılaştırılmıştır. Dövme işleminin malzemede oluşturduğu mekanik etkiler incelenip dinamik yeniden kristalleşmenin oluşmasıyla malzemede ki değişimler araştırılmıştır. Dinamik yeniden kristalleşme ile dislokasyon yoğunluğu arasındaki ilişki gösterilmiştir. Aynı zamanda mikro sertlik değerleri HV0.5 göre ölçülüp dislokasyon yoğunluğu ile ilişkisi incelenmiştir. Yapılan analizler sonucu ana malzemenin dislokasyon yoğunluğu dövme işlemi sonrası ortalama %50 azalmış, kristalite boyutu ise ortalama %20 artmıştır. Dövme işlemi sonrası malzemede kafes gerinim değerinin yaklaşık %30 azaldığı gözlemlenmiştir. Bu değerlerin değişimi ile sertlik değerleri arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler:34CrNiMo6, Dövme, Dislokasyon yoğunluğu

1. Giriş (Introduction)

Çelik, düşük maliyeti, alaşım elementi ilavesi, mekanik işleme yoluyla çok çeşitli mekanik özellikler elde etme olasılığı sayesinde genellikle yapısal uygulamalarda kullanılır [1-2]. 34CrNiMo6, bir tür yüksek kaliteli orta karbonlu düşük alaşımlı çeliktir. Deutsches Institut für Normung (DIN) standartlarına aittir ve Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsüne göre (AISI) 4340 olarak adlandırılır. Belirli miktarda Cr, Ni ve Mo elementlerinin eklenmesi sayesinde çeliğin sertleşebilirliğini ve tavlama stabilitesini iyileştirir. Yüksek mukavemet, tokluk, yorulma ve aşınma özelliklerine sahiptir [3]. Krank milleri, yüksek hızlı demiryolu aksları, uçaklarda iniş takımı, uçak şasisi, somunlar ve çelik silindir gibi büyük enine kesitlere ve karmaşık şekillere sahip yük taşıyan bileşenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [4-6]. Bu çelik özellikle farklı yapısal uygulamalar için ısıtılma işlem görmüş koşullarda kullanılır, çünkü ısıtılma işlem görmemiş koşullarda toklukları azdır [7-8]. Bu nedenle literatürde su verme, temperleme ve östemperleme gibi ısıtılma işlemleri uygulanarak kullanılır. İçerisindeki alaşım elementleri sadece sertleşebilirliğin artmasına katkıda bulunmazlar, aynı zamanda beynit stabilizatörleri olarak da işlev görürler [9-11]. Örneğin krom, beynitik başlangıç sıcaklığında azalmaya ve beynitik dönüşüm için kuluçka süresinin uzamasına neden olur. Benzer şekilde silikon (Si) beynitik dönüşüm için itici gücü artırır ve molibden beynitik dönüşümü engelleyen beynitik öncesi reaksiyonları bastırır [12-14]. Gelişmiş modern ultra yüksek mukavemetli çelikler, özellikle dövme için kullanıldıklarında çok sıkı kontrol edilen mikro yapı ve mekanik özellikler gerektirir. 34CrNiMo6 malzemesi genellikle geleneksel yöntemlerden dövme yöntemiyle üretilmektedir [15].

Farklı ısıtılma işlem rotaları ve üretim yöntemleri ile bu malzemede oluşan değişimler sıklıkla çalışılmıştır. Fakat dislokasyon ilişkisi ve kristalografik değişimleri ile ilgili çalışmalar yeterli değildir. Bu çalışma da 34CrNiMo6 malzemesi sıcak dövme ile şekillendirilip dislokasyon yoğunluğunun mekanik özellikler ile ilişkisi araştırılmıştır.

2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

Deneyisel çalışmada ticari olarak satın alınan 34CrNiMo6 malzemesi kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal bileşimi % ağırlık olarak Tablo 1 de verilmiştir.

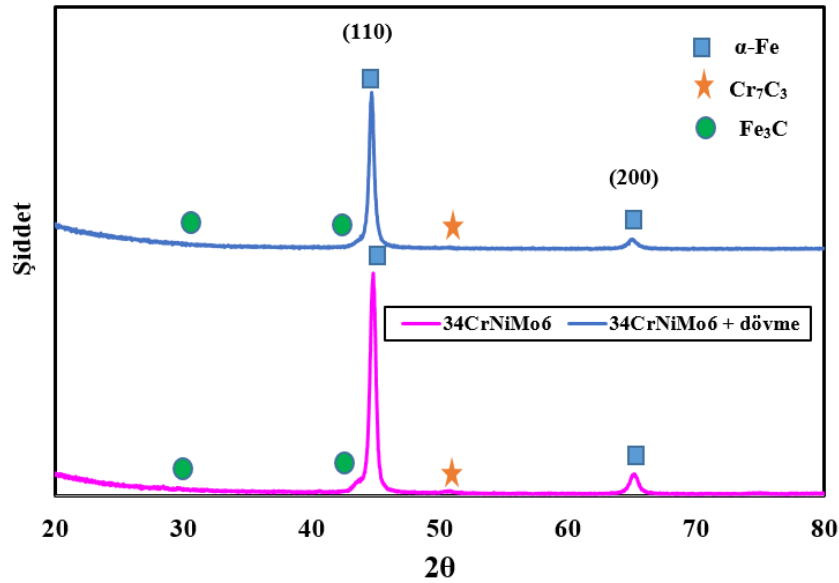
Tablo 1. 34CrNiMo6 malzemesinin kimyasal analizi (Chemical analysis of 34CrNiMo6 material)

Elementler (%)								
C	Ni	Cr	Mn	Mo	Si	S	P	Fe
0.35	1.51	1.57	0.61	0.28	0.27	0.002	0.004	Kalan

55mm çapındaki malzeme 600 kw indüksiyon bobinde ısınmıştır. 1150 °C'de indüksiyondan alınıp 1100 °C'de 6300 tonluk HUTA marka havalı çekiçte, açık kalıpta dövme işlemi uygulanmıştır. 12 mm kalınlığa inen malzemenin çapak kesme işlemi yaklaşık 900 °C de yapılmıştır. Çapak kesme işleminden sonra soğumaya bırakılan malzeme, Endumak marka kumlama tezgahında S390 granüllerle kumlanmıştır. Dövme prosesi biten malzemeler analizler için kesilip zımparalama, parlatma ve dağlama işleminden geçip JEOL JSM-6060LV marka Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ile mikro yapılarına bakılmıştır. JEOL JSM 6060LV enerji-dağıtıcı X-ışını spektrometresi (EDS) ile element dağılımları analiz edildi. XRD analizleri Bruker D8 Advance cihazı kullanılarak elde edilmiştir. X-ışını kaynağı olarak monokromatik Cu K α ışını ($\lambda= 1.54056 \text{ \AA}$) kullanılmış 40 kV ve 40mA'da desenler elde edilmiştir. Numuneler 2 θ 20-80° aralığında 0,04°/dk tarama hızında taranmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Ana malzemenin ve dövme işlemi yapılan numunenin XRD desenleri Şekil 1 de görülmektedir. Numunelerde 20-80° aralığında 2 düzlemde kırınım deseni görülmüştür. Ana pik olarak iki grup numunede de α -Fe ferrit piki en yüksek şiddet ile (110) düzleminde görülmektedir. Bu düzlem çelik alaşımlarında önerilen en yoğun pik düzlemdir [25]. (110) ve (200) düzleminde ki şiddetleri dövme işlemiyle bir miktar azaldığı tespit edilmiştir. Numunelerde az bir şiddet ile MC tipi karbürlerin varlığına rastlanmıştır. Şekil 2 de yer alan mikro yapı görüntüleri bu karbürleri desteklemektedir.



Şekil 1. Numunelerin XRD grafikleri (XRD plots of samples)

XRD analizi yoluyla malzemelerin mikro gerinim, kristalite boyutu ve dislokasyon yoğunluğu değerleri denklem 1 ve 2 de görüldüğü üzere Debye Scherrer formülünden hesaplanmıştır. Değerler Tablo 2 de görülmektedir.

Debye Scherrer formülü [16]

$$Dp = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

Burada; Dp: kristalite boyutu, k: 0.94, λ : 1.54 Å, β : (FWHM) değerini göstermektedir.

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4 \cdot \tan \theta} \quad (2)$$

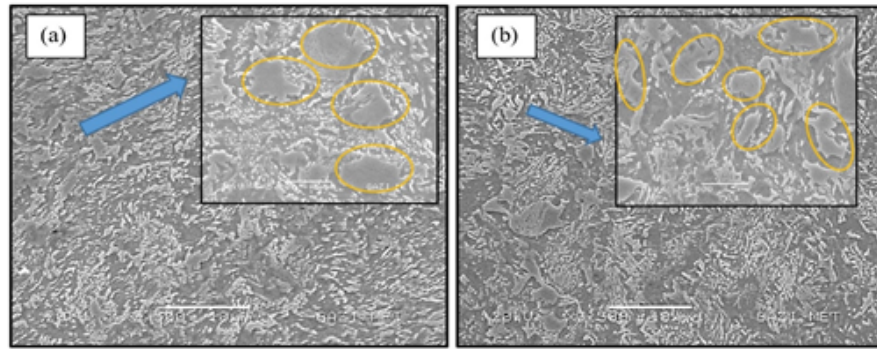
Burada; ε : mikro gerinimi, β : (FWHM) değerini göstermektedir.

Tablo 2 de görüldüğü üzere 34CrNiMo6 malzemesi sıcak olarak dövüldüğünde yapıdaki dislokasyon yoğunluğunda azalma olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca tane boyutunda da artış olduğu görülmektedir. Bu değerler ile beraber mikro gerinim değeride sıcak olarak dövme sonrası azalmıştır. Bilindiği üzere yeniden kristalleşme yayınma kontrollü bir prosestir. Yayınmanın katkısıyla dislokasyon yoğunluğu azalmakta, dayanım azalırken süneklik artmaktadır. Böylece yapı dislokasyon yoğunluğu azalan ve yeniden kristalleşen bir görünüm almaktadır. Yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yapılan şekillendirme ile malzemede pekleşme olmaz [17-18,23]. Sıcaklık ile deformasyon olduğunda bu durum dinamik yeniden kristallenme olarak adlandırılmaktadır. Dinamik yeniden kristalleşme kendi içinde de sürekli ve süreksiz yeniden kristalleşme olarak ayrılır. Sürekli yeniden kristalleşmede, dislokasyonlar önce toparlanma göstererek alt tane sınırlarına (küçük açılı tane sınırları) absorbe edilir ve sonunda büyük açılı tane sınırları oluşturarak yeni tanelerin oluşumu sağlanır. Süreksiz yeniden kristalleşme ise yeni tanelerin büyük açılı tane sınırına göçmesiyle çekirdeklenme ve büyümesi sonucu olur. Bu mekanizmaya süreksiz denmesinin nedeni ise deformasyona uğramış tanelerin dislokasyon yoğunluğunun homojen biçimde olmamasıdır. Dislokasyonların hareket halindeki tane sınırlarında süreksiz biçimde azaltılmasından dolayı bu isimle adlandırılmıştır [19,23]. Sıcaklık, malzemenin akma dayanımını azaltmakta ve şekillendirme sırasında daha düşük kuvvetler gerekmektedir. Sıcak şekil değişimi sırasında oluşan dislokasyonlar anında ve dinamik olarak etkin olan yayınmanın katkısıyla yok olmakta ve dislokasyon sayısı deformasyonla birlikte artmamaktadır. Bu sayede malzemede pekleşme oluşmaz ve şekillendirebilme kabiliyeti artmaktadır [19-20]. Böylece elde ettiğimiz dislokasyon yoğunluğu, kristalite boyutu ve mikro gerinim değerlerinde ki değişimin literatür ile uyduğu görülmüştür.

Tablo 2. Numunelerin 2 farklı düzlemlerdeki dislokasyon yoğunlukları, mikro gerinim ve kristalite boyutu değerleri (Dislocation densities, micro-strain and crystallite size values of the samples in 2 different planes)

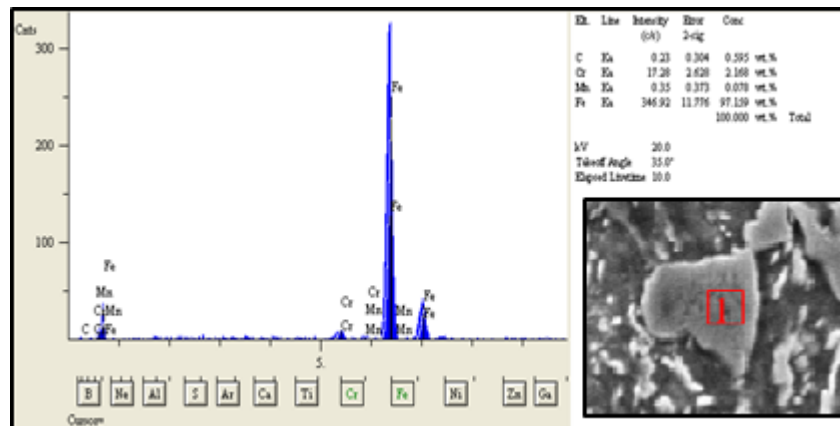
Numuneler	Dislokasyon Yoğunluğu ($1/m^2$)	Kristalite boyutu Å	Mikro Gerinim
34CrNiMo6 (110)	$4,36*10^{15}$	151,3817	0,000895552
34CrNiMo6 (200)	$10,32*10^{15}$	98,5276	0,002000504
34CrNiMo6+Dövme (110)	$4,01*10^{15}$	157,9094	0,000858531
34CrNiMo6+Dövme (200)	$5,11*10^{15}$	139,9607	0,001408287

Şekil 2 (a) ve (b) de numunelerin SEM mikro yapı görüntüleri x2500 ve x5000 büyütmede görülmektedir. Şekil 2 (a) da ana malzeme 34CrNiMo6 (b) de ise sıcak dövme işlemi yapılmış 34CrNiMo6 malzemesinin mikro yapıları görülmektedir. İki mikro yapıda da ana matris ferrittir ve perlitik dönüşümler yer almaktadır. Şekil 2 de görülen sarı bölgelerin sıcak dövme sonrası arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 2. Numunelerin x2500 ve x5000 büyütmede SEM mikro yapı görüntüleri (a) ana malzeme 34CrNiMo6 (b) sıcak dövme yapılmış 34CrNiMo6 malzemesi (SEM microstructure images of samples at x2500 and x5000 magnification (a) base material 34CrNiMo6 (b) hot forged 34CrNiMo6 material)

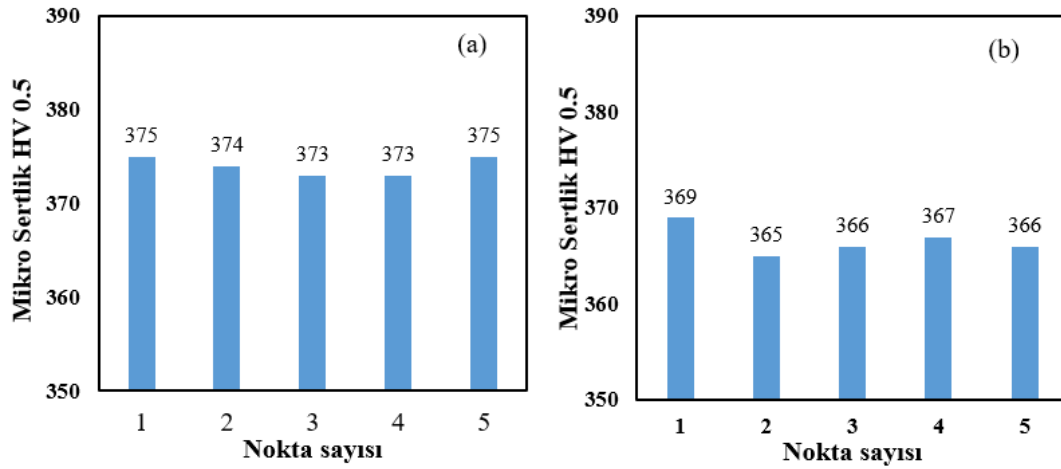
Şekil 2 de yer alan sarı bölgelere yapılan EDS analizi sonucu Fe, C ve Cr elementinin daha fazla olduğu görülmüştür. EDS analizleri Şekil 3 de görülmektedir. Bu bölgelerin MC tipi karbürler olacağı düşünülmektedir [21,22]. Bu durum XRD grafikleriyle desteklenmektedir.



Şekil 3. Sarı bölgelerin EDS analizi (EDS analysis of yellow regions)

Dövme işlemiyle mekanik yönden değişimleri test etmek için mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. 5 farklı bölgeden analiz edilen ortalama mikro sertlik değerleri Şekil 4 görülmektedir. Şekil 4 (a) görüldüğü üzere ortalama 34CrNiMo6 ana malzemesinin sertliği 374 HV0.5 bulunmuştur. Şekil 4 (b) görüldüğü üzere sıcak dövme işlemi uygulanmış 34CrNiMo6 malzemesinin ortalama sertliği 366.6 HV0.5 olarak bulunmuştur. Dövme işlemi sonrası sertlik değerinde bir miktar azalma gözlemlenmiştir.

Bu durumu XRD analizi ile hesapladığımız dislokasyon yoğunluğunda ki azalma ve tane boyutunun bir miktar artması desteklemektedir. Tane boyutunun artması hall patch etkisiyle dayanımı azaltacağından sertliğinde azalmasına sebep olabileceği düşünülmektedir [24].



Şekil 4. Numunelerin 5 farklı noktadan mikro sertlik değerleri (a) 34CrNiMo6 ana malzeme (b) sıcak dövme işlemi uygulanmış 34CrNiMo6 malzemesi (Microhardness values of the samples from 5 different points (a) 34CrNiMo6 base material (b) hot forged 34CrNiMo6 material)

4. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusions and Suggestions)

- 1) XRD analizleri sonucu en yoğun pik düzlemi (110) düzleminde görülmüştür. Bu düzlem çelik alaşımlarında önerilen en yoğun düzlemdir.
- 2) Sıcak dövme işlemi sonucunda malzemenin mikro gerinim değerinin ve dislokasyon yoğunluğunun azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca kristalite boyutu sıcak dövme işlemi sonrası artmıştır.
- 3) Dövme yapılan numunenin mikro yapılarında MC tipi karbürlerin arttığı görülmüştür.
- 4) Mikro sertlik değeri en yüksek 34CrNiMo6 ana malzemesinde ortalama 374 HV0.5 ölçülmüştür.
- 5) Sıcak şekillendirme yapılan bu malzemenin farklı mekanik testler yapılarak mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir

Teşekkür (Acknowledgment)

Çalışma [FYL-2021-7393] hibe numarası ile Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Destekleri için Gazi Üniversitesi kurumuna teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] G. Altuntaş, O. Altuntaş, M. K. Öztürk, and B. Bostan, "Metallurgical and Crystallographic Analysis of Different Amounts of Deformation Applied to Hadfield Steel," *International Journal of Metalcasting*, vol. 16, pp. 1-10, 2022. doi:10.1007/s40962-022-00860-3
- [2] A. Güral and O. Altuntaş, "Improving the impact toughness properties of high carbon powder metallurgy steels with novel spherical cementite in the bainitic matrix (SCBM) microstructures," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 259, pp. 124203, 2021. doi:10.1016/j.matchemphys.2020.124203
- [3] A. K. Belyaev, A. M. Polyanskiy, V. A. Polyanskiy, C. Sommitsch, and Y. A. Yakovlev, "Multichannel diffusion vs TDS model on example of energy spectra of bound hydrogen in 34CrNiMo6 steel after a typical heat treatment," *International journal of hydrogen energy*, vol. 41, pp. 8627-8634, 2016. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.03.198
- [4] S. Maropoulos, N. Ridley, and S. Karagiannis, "Structural variations in heat treated low alloy steel forgings," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 380, pp. 79-92, 2004. doi:10.1016/j.msea.2004.03.053
- [5] A. Kuduzović, M. C. Poletti, C. Sommitsch, M. Domankova, S. Mitsche, and R. Kienreich, "Investigations into the delayed fracture susceptibility of 34CrNiMo6 steel, and the opportunities for its application in ultra-high-strength bolts and fasteners," *Materials*

Science and Engineering: A, vol. 590, pp. 66-73, 2014. doi:10.1016/j.msea.2013.10.019

[6] M. G. Hebsur, "Recent attempts of improving the mechanical properties of AISI 4340 steel by control of microstructure—A brief review," *Journal of materials for energy systems*, vol. 4, pp. 28-37, 1982. doi:10.1007/BF02833379

[7] S. M. Safi and M. K. B Givi, "A new step heat treatment for steel AISI 4340," *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 56, pp. 78-80, 2014. doi:10.1007/s11041-014-9707-z

[8] R. Araujo Barros, A. J. Abdalla, H. L. Rodrigues, and M. dos Santos Pereira, "Characterization of a AISI/SAE 4340 steel in different microstructural conditions," *In Materials Science Forum*, vol. 775, pp. 136-140, 2014. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.775-776.136

[9] Q. Meng, P. La, L. Yao, P. Zhang, Y. Wei, and X. Guo, "Effect of Al on microstructure and properties of hot-rolled 2205 dual stainless steel," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol.1, pp. 1-10, 2016. doi:10.1155/2016/7518067

[10] C. Capdevila, C. FG, and C. G. De Andrés, "Determination of Ms temperature in steels: A Bayesian neural network model," *ISIJ international*, vol. 42, pp. 894-902, 2002. doi:10.2355/isijinternational.42.894

[11] K. C. Hwang, S. Lee, and H. C. Lee, "Effects of alloying elements on microstructure and fracture properties of cast high speed steel rolls: Part I: Microstructural analysis," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 254, pp. 282-295, 1998. doi:10.1016/S0921-5093(98)00626-1

[12] Y. Toji, H. Matsuda, and D. Raabe, "Effect of Si on the acceleration of bainite transformation by pre-existing martensite," *Acta Materialia*, vol. 116, pp. 250-262, 2016. doi:10.1016/j.actamat.2016.06.044

[13] J. G. Speer, D. V. Edmonds, F. C. Rizzo, and D. K. Matlock, "Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 8, pp. 219-237, 2004. doi:10.1016/j.cossms.2004.09.003

[14] O. Matsumura, Y. Sakuma, and H. Takechi, "Enhancement of elongation by retained austenite in intercritical annealed 0.4 C-1.5 Si-O. 8Mn Steel," *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 27, pp. 570-579, 1987. doi:10.2355/isijinternational1966.27.570

[15] A. Łukaszek-Sołek, J. Krawczyk, T. Śleboda, and J. Grelowski, "Optimization of the hot forging parameters for 4340 steel by processing maps," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, pp. 3281-3290, 2019. doi:10.1016/j.jmrt.2019.05.018

[16] P. Scherrer, "Bestimmung der inneren Struktur und der Größe von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen," *In Kolloidchemie Ein Lehrbuch* vol. 1, pp. 387-409, 1912. doi:10.1007/978-3-662-33915-2_7

[17] G. E. Totten, *Steel Heat Treatment Handbook-2*, vol. 2, pp. 27-120, 2006. doi:10.1201/9781482293029

[18] D. R Askeland, P. P hulé, W. J. Wright and D. K. Bhattacharya, *The science and engineering of materials*, vol.12 pp. 81-91, (2003). doi.org/10.1007/978-94-009-1842-9

[19] S. Kayalı and H. Çimenoğlu, *Plastik şekil verme ilke ve uygulamaları*. Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, vol.10, pp. 60-100, 1995

[20] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Fundamentals of materials science and engineering*, Fifth Edition, Utah, vol. 471660817, pp. 30-122, 2000.

[21] K. Miyata, T. Kushida, T. Omura, and Y. Komizo, "Coarsening kinetics of multicomponent MC-type carbides in high-strength low-alloy steels," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 34, pp. 1565-1573, 2003. doi:10.1007/s11661-003-0303-x

[22] B. J. Lee, "On the stability of Cr carbides," *Calphad*, vol. 16, pp. 121-149, 1992. doi:10.1016/0364-5916(92)90002-F

[23] S. E. Ion, F. J. Humphreys, and S. H. White, "Dynamic recrystallisation and the development of microstructure during the high temperature deformation of magnesium," *Acta Metallurgica*, vol. 3, pp. 1909-1919, 1982. doi:10.1016/0001-6160(82)90031-1

[24] Y. Bergström and H. Hallén, "Hall-Petch relationships of iron and steel," *Metal science*, vol. 17, pp. 341-347, 1983. doi:10.1179/030634583790420808

[25] P. E. Roger Brockenbrough and F. S. Merritt, *Structural Steel Designer's Handbook*, vol. 2, pp. 60-92, 2011.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Residences In Turkey's Provinces Energy Efficiency Event

Kübra Erdem Arslan ^{a,b*} Adnan Sözen ^c

Submitted: 04.07.2022 Revised: 13.09.2022 Accepted: 20.09.2022 doi:10.30855/gmbd.0705045

ABSTRACT

Keywords: Data Envelopment Analysis (DEA), Constant Returns to Scale and Variable Returns to Scale, Energy Efficiency

^{a,*} Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Energy Systems Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8373-2674
e mail: kubraerdem25@gmail.com

^b Sakarya Elektrik Perakende A.Ş.,
41050 -Kocaeli, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5979-4197

^c Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Energy Systems Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5979-4197

*Corresponding author:
kubraerdem25@gmail.com

The total energy consumption of Turkey is consumed in residence approximately %20 for this reason It seems that the issues that need to be addressed first are the energy saving potential and environmental impacts. In this study,energy efficiency and environmental performance of residences between 2019 – 2020. were calculated with non-parametric Data Envelopment that using Energy, demographic and environmental parameters of 81 provinces in Turkey. The sourting of the provinces performance was obtained with super efficiency model. Efficiency is defined as the ability of provinces to transform their energy-influencing inputs into energy efficiency .In the analysis made according to the energy consumption performance per dwelling, 25.9% of the provinces were efficient, while in the study conducted according to the environmental performance per energy consumption, 13.58% of the provinces were found to be efficient. As a result of the analysis, input/output parameters were evaluated, and the results of energy efficiency and environmental efficiency were interpreted on a provincial basi and put forward a proposal to decision maker.

Türkiye'deki İllerde Bulunan Meskenlerin Enerji Verimliliği Etkinliği

ÖZ

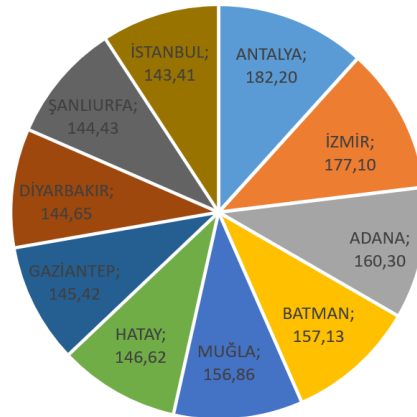
Türkiye'deki toplam enerji tüketiminin yaklaşık %20'si meskenlerde gerçekleşmekte olduğundan meskenlerdeki enerji tasarruf potansiyeli ve çevresel etkilerinin öncelikle ele alınması gereken konular olduğu görülmektedir. Yapılan bu çalışmada Türkiye'deki 81 ilin enerji, demografik ve çevresel parametreleri kullanılarak 2019 – 2020 yılları arasındaki meskenlerin enerji verimlilik ve çevresel performans etkinliği parametrik olmayan Veri Zarflama Analizi (VZA) ile değerlendirilmiş, illerin performans sıralaması Süper Etkinlik modeli ile elde edilmiştir. Burada etkinlik illerin enerjii etkileyen girdilerini enerji verimliliğine dönüştürme becerisi olarak tanımlanmıştır. Analizde “Mesken Başına Düşen Enerji Tüketim Performansı” ve “Enerji Tüketimi Başına Çevresel Performans” değerlendirilmiştir. Mesken başına düşen enerji tüketim performansına göre yapılan analizde illerin %25,9'u etkin iken, enerji tüketimi başına çevresel performansına göre yapılan çalışmada ise illerin %13,58'nin etkin durumda olduğu görülmüştür. Analiz sonucunda ele alınan girdi/çıktı parametreleri değerlendirilerek il bazında enerji verimlilikleri ve çevresel etkinlik sonuçları yorumlanmış ve karar vericilere öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Veri Zarflama Analizi (VZA), Ölçeğe göre sabit ve değişken getiri yaklaşımı, Enerji Verimliliği

1. Giriş (Introduction)

Enerji ve ekonomi arasındaki yakın ilişki ülkelerin gelişmişlik düzeylerini gösteren en önemli parametrelerdir. Nüfus artışı, sanayileşme, ekonomik büyüme ve teknolojinin gelişimiyle beraber enerjiye duyulan ihtiyaçta artmıştır. 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizi enerji kaynaklarına duyulan ihtiyacın sınırsız olduğu, enerji kaynaklarının ise sınırlı olduğunu göstermiştir. Artan enerji fiyatları ekonomiyi doğrudan etkilediği için enerji kaynaklarının verimli kullanılmasının önemini arttırmaktadır [1].

Türkiye'de Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, 1981'de, enerji verimliliği çalışmalarına başlamıştır [2]. Türkiye enerji tasarruf potansiyeli sektör bazlı incelendiğinde; %30 bina sektöründe, %20 sanayi sektöründe, %15 ulaşım sektöründe olduğu görülmektedir [3]. Binalardaki %30'luk tasarruf potansiyeli 7 milyar TL'den fazladır ve bu da dört Keban Barajı inşa edebilecek miktara denk gelir [1]. 5 Aralık 2019 daresmi gazetede yayınlanan "Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği" ile binalarda enerji verimliliği çalışmaları hız kazanmıştır. Türkiye'deki bina stokunun %87'sini meskenlerin oluşturduğunu düşünürsek, meskenlerdeki enerji tasarruf potansiyelinin ne kadar önemli olduğu aşikardır [4]. Şekil 1'de mesken başına enerji tüketiminin (kWh) en yüksek olduğu 10 il gösterilmiştir.



Şekil 1. 2020 yılında mesken başına düşen enerji tüketiminin (kWh) en yüksek olduğu 10 il (Energy per household in 2020 10 provinces with the highest consumption (kWh)) [5]

Literatürde enerji performansı, illerdeki, meskenlerdeki ve binalardaki enerji etkinliği ile ilgili yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Özgür, imalat sektöründeki firmaların enerji etkinliğini veri zarflama analizini kullanarak kıyaslamıştır. Girdi verisi olarak elektrik ve doğalgaz tüketimlerini alırken çıktı verisi olarak satışları baz almıştır. Marmara bölgesinde bulunan 7 işletmede "DEA-Solver Learner Version 3.0" yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonucuna göre üç işletmenin verimli sınır çizgisinin altında kaldığı görülmüştür. Bu işletmelerin verimli sınır çizgisi üzerinde yer alabilmesi için, kendilerine en yakın bulunan iki noktaya olan mesafeleri kadar verimlilik çalışmaları yapmaları gerekmektedir [6]. Yiğit, Avrupa ülkeleri ile Türkiye'de yürürlükte olan Enerji Kimlik Belgesi uygulamalarını inceleyerek Türkiye'deki konutların enerji verimliliğini aydınlatma konusu kapsamında değerlendirmişlerdir. Konutlarda yaygın olarak kullanılan akkor ve kompakt floresan lambaların yıllık enerji tüketim değerlerini hesaplayarak, aydınlatmaya yönelik tasarruf potansiyeli belirlenmiştir [7]. Morgül, 2013-2014 yılları arasında konutlardaki elektrik tüketimini, anket çalışması ile çapraz tablolama yöntemiyle değerlendirmiştir [8]. Woo ve arkadaşları, 31 OECD ülkelerinde 2004-2011 yılları arasındaki statik ve dinamik çevresel yenilenebilir enerji verimliliğini araştırmışlardır. Girdi değişkeni olarak, iş gücü, sermaye yenilenebilir enerji arzı, çıktı değişkeni olarak ise CO₂ emisyonu ve GYSH kullanılmıştır [9]. Türkoğlu, 2010-2014 yılları arasındaki verilerden yararlanarak OECD ülkelerinin enerji etkinlik analizini VZA ile yapmıştır. OECD ülkelerini GYSH göre iki gruba ayırmış ve dört farklı veri zarflama modeli oluşturmuştur. Çalışmanın sonunda VZA ve lojistik regresyon analizi yöntemlerinin OECD ülkelerinin enerji etkinliklerinin değerlendirilmesinde ve enerji etkinliğini etkileyen dinamiklerin belirlenmesinde anlamlı sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir [10]. Koçak, 2016 yılındaki verileri kullanarak 81 ilin tüketici türü bazında elektrik tüketimleri karşılaştırılmıştır. Çalışma sırasında girdiye yönelik CCR ve BBC modelleri kullanmış ve EMS paket programından yararlanılmıştır. CCR

modelinin sonucuna göre 81 ilden 15 tanesi etkin çıkarken 66 tanesi etkin çıkmamıştır. Etkinsiz illerin etkin olabilmeleri için öneriler sunulmuştur [11]. Demirsoy, 2015-2017 yılları arasındaki verileri kullanarak enerji kimlik belgesi uygulamasının illerdeki konutlara enerji etkisini araştırmıştır. Araştırma sırasında Türkiye'deki 81 ilin enerji ve çevre performansları ilgili göstergelerden yararlanmıştır. VZA analizinde EMS paket programından yararlanılmış, ayrıca etkin illeri de kendi içerisinde sıralayabilmek için süper etkinlik modeli analize dahil edilmiştir. [12].

Bu çalışmada ise, 81 ildeki meskenlerin enerji, demografik yapı, konut sayısı, Enerji Kimlik Belgesine sahip bina sayısı, çevresel etki verileri ve GYSH verileri göz önüne alınarak illerin enerji etkinliklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında iki model oluşturulmuştur. Kullanılan veriler, TÜİK, EPDK ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) veri tabanından alınmıştır. Enerji etkinliklerinin belirlenmesi aşamasında Veri Zarflama Analizi kullanılmıştır. Çalışmanın temel hedefi kanunlarla desteklenmiş ve uygulamaya konulmuş enerji kimlik belgesi alan bina sayılarının seviyesi, binaların kullandıkları enerjiyi istenilen düzeyde enerji verimliliğine dönüştürme becerisini ve bu enerjiyi kullanırken çevresel etkilere minimum düzeyde dönüştürme becerileri araştırılmıştır. Etkinlik tanımı ile binalardaki enerji verimliliğinin boyutu belirlenmiş ve başarılı olan illerin kendi içerisinde sıralaması için de Süper Etkinlik kavramından yararlanılmıştır. Etkinlik analizinde EMS 1.3 paket programı kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metod (Material and Method)

2.1. Veri zarflama analizi (Data envelopment analysis)

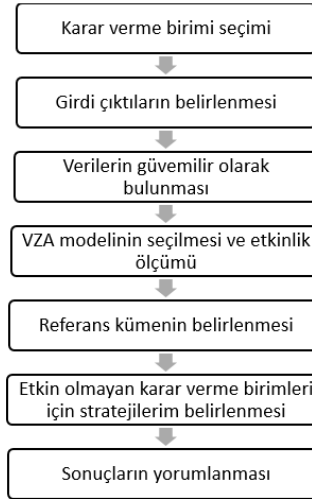
Etkinlik ölçümünde en çok kullanılan yöntemlerden biri Veri Zarflama Analizidir (VZA) [13]. VZA, hedef olarak belirlenen etkinlik ölçümünün çıktı olarak nitelendirildiği, bu çıktıyı etkileyen parametrelerin girdi olarak tanımlandığı ve birbirinden boyut olarak bağımsız değişkenlerin yer aldığı çok parametrelilik etkinlik ölçme metodudur. Metotta Karar Verme Birimleri Türkiye'deki 81 ildir.

VZA, ilk olarak, Charnes, Cooper ve Rhodes tarafından, benzer karar verme birimlerinin göreceli etkinliklerinin ölçülmesi amacı ile geliştirilen parametrik olmayan bir etkinlik yöntemidir [14]. Şekil 2'de veri zarflama analizi yapılırken izlenecek adımların akış diyagramı gösterilmiştir.

VZA'da karar verme birimlerinin göreceli etkinliği, çıktıların ağırlıklı toplamının girdilerin ağırlıklı toplamına oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Etkinlik, birimlerin kendi girdileri ile çıktıları ne ölçüde yaratabildiklerini gösteren skorlardır. Etkinliğin ölçüsü 0 ile 1 arasında olabilir; etkinlik skoru 1 olan karar verme birimleri etkin olarak adlandırılırken, 0 ile 1 arasında skorlanan karar verme birimleri etkin olmayan olarak adlandırılmaktadır. Etkin olmayan bir karar verme birimi etkin hale gelebilmek için etkinlik skorunu 1'e dönüştürmesi gerekmektedir. Bu durumda girdi ve çıktı değişkenlerindeki eksiklik veya fazlalıkları gidermesi gerekecektir [12].

Literatürde sıklıkla kullanılan VZA modelleri ; CCR modeli ölçeğe göre sabit getiri varsayımına sahiptir ve Charnes, Cooper, Rhodes tarafından 1978 de geliştirilmiştir. Girdideki artış miktarı çıktıda artış miktarı ile doğru orantılıdır. Diğer model ise BCC modelidir, ölçeğe göre değişken getiri varsayımına dayanır Banker, Charnes, Cooper tarafından ortaya atılmıştır. Eldeki girdiler ile maksimum çıktı üretimini göstermektedir [13].

Ölçeğe göre sabit getiri (CCR) varsayımı, ölçeğe göre değişken getiri varsayımını (BCC) kapsar. Bu sebeple analizde CCR modeli kullanılmıştır. CCR Modelinde girdideki artış miktarı kadar çıktıda da artış gerçekleşmektedir. Girdi yönelimli CCR modelinde amaç, mevcut çıktıyı minimum girdiyle elde edebilmektir. Çıktı yönelimli CCR modelinde ise amaç girdi değerlerini sabit tutarak maksimum çıktıyı elde etmektir. Tablo 1'de VZA'nın kullandığı girdi yönelimli ve çıktı yönelimli CCR modelinin matematiksel fonksiyonları verilmiştir.



Şekil 2. VZA işlem adımları (DEA process steps) [15]

Tablo 1. CCR modeli [16] (CCR model)

Girdi Esaslı CCR Modeli
Amaç Fonksiyonu:
$\text{Max } e_o = \sum_{r=1}^s (\text{uryro})$
Kısıtlar :
$\sum_{r=1}^s (\text{uryrj}) - \sum_{i=1}^m (\text{vixij}) \leq 0$
$\sum_{i=1}^m (\text{vixio}) = 1$
Çıktı Esaslı CCR Modeli
Amaç Fonksiyonu:
$\text{Min } e_o = \sum_{i=1}^m (\text{vixio})$
Kısıtlar :
$\sum_{i=1}^m (\text{vixij}) - \sum_{r=1}^s (\text{uryrj}) \geq 0$
$\sum_{r=1}^s (\text{uryro}) = 1$
$ur, vi \geq 0 ; j = 1, \dots, n$
$r = 1, \dots, s ; i = 1, \dots, m$
n: Karar Verme Birimi Sayısı $j = 1, 2, \dots, n$
s: Çıktı Sayısı $r = 1, 2, \dots, s$
m: Girdi Sayısı $i = 1, 2, \dots, m$
ur: o. karar verme biriminin r. çıktıya verdiği ağırlık değeri
vi: o. karar verme biriminin i. girdiye verdiği ağırlık değeri
xio: o. karar verme birimi tarafından kullanılan i. girdi miktarı
yro: o. karar verme birimi tarafından elde edilen r. çıktı miktarı
xij: j. karar verme birimi tarafından kullanılan i. girdi miktarı
yrj: j. karar birimi tarafından elde edilen r. çıktı miktarı

3. Bulgular (Results)

Bu çalışmada Türkiye'deki 81 ile ait meskenlerin enerji performanslarının hesaplanması amacıyla illerdeki mesken başına tüketim ve meskenlerdeki tüketimin çevresel parçacık sürüsü algoritmasıyla araştırıldı. etkileri dikkate alınarak iki model oluşturulmuştur.

Model 1: Mesken başına düşen enerji tüketim etkinliği (Enerji girdilerini kullanarak minimum enerji tüketimini gerçekleştiren iller etkindir)

Model 2: Enerji tüketimi başına çevresel etki etkinliği (Enerji girdilerini minimum çevresel etkiye dönüştüren iller etkindir)

Hesaplamalarda ölçeğe göre sabit getiri varsayımı ve ölçeğe göre değişken varsayımı sonuçları eşit çıkmıştır. Bunun nedeni ile CCR varsayımının BCC modelini kapsamasından kaynaklıdır. Bu sebeple

hesaplamalar tek bir tabloda toplanarak verilmiştir. Tablo 2’de oluşturulan etkinlik analiz modellerine ait girdi çıktı değişkenleri verilmiştir.

Tablo 2. Girdi / Çıktı değişkenleri (Input and output variables)

MODEL	GİRDİLER	ÇIKTILAR
Mesken Başına Düşen Enerji Tüketim Performansı	KİŞİ BAŞINA /MESKEN SAYISI	
	NÜFUS ARTIŞ HIZI (%) (2019-2020)	
	KİŞİ BAŞINA GYSH (\$) (2020)	
	KİŞİ BAŞINA GYSH ARTIŞI (%) (2019-2020)	
	BİRİNCİL ENERJİ TÜKETİMİ (2020 MWh)	
	KİŞİ BAŞINA BİRİNCİL ENERJİ TÜKETİMİ (2020 MWh)	
	ISITMA-SOĞUTMADA YENİLENEBİLİR GES KULLANIMI	
	ISITMA-SOĞUTMADA YENİLENEBİLİR RES KULLANIMI	Mesken başına enerji tüketimi (MWh)
Enerji Tüketimi Başına Çevresel Performans	NÜFUS ARTIŞ HIZI (%) (2019-2020)	
	KİŞİ BAŞINA GYSH (\$) (2020)	
	KİŞİ BAŞINA GYSH ARTIŞI (%) (2019-2020)	
	BİRİNCİL ENERJİ TÜKETİMİ (2020 MWh)	
	KİŞİ BAŞINA BİRİNCİL ENERJİ TÜKETİMİ (2020 MWh)	
	ISITMA-SOĞUTMADA YENİLENEBİLİR GES KULLANIMI	
	ISITMA-SOĞUTMADA YENİLENEBİLİR RES KULLANIMI	Meskenlerdeki CO2 emisyonu

3.1. Enerji tüketim etkinlik sonuçları (Model 1) (Energy consumption efficiency results (Model 1))

Model 1’de “Mesken Başına Düşen Enerji Tüketim Etkinliği” nin Tablo 2’de verilen girdi ve çıktı değişkenleri kullanılarak elde edilen etkinlik skorları sonuçları Tablo 3’de verilmiştir. Etkinlik skorları %100 olan yani 1 değerine sahip olan iller, binalarında enerji girdilerini kullanarak minimum enerji tüketimini sağlamışlardır. Etkin olmayan iller için ise Benchmark değerleri tanımlanarak etkin olabilmeleri için referans aldıkları illerin sıra numarasına göre değerlerini % olarak dönüştürme değerlerine taşınmaları gerekmektedir.

Tablo 3. Model 1 illerin etkinlik değerleri (Model 1 efficiency values of provinces)

İllerin Sırası	İl Adı	Skor	Etkinlik Durumu-[BENCHMARK : il sırası (% değişim)]
4	Ağrı	100,00%	Etkin
8	Antalya	100,00%	Etkin
9	Ardahan	100,00%	Etkin
10	Artvin	100,00%	Etkin
14	Batman	100,00%	Etkin
15	Bayburt	100,00%	Etkin
35	Gümüşhane	100,00%	Etkin
36	Hakkari	100,00%	Etkin
37	Hatay	100,00%	Etkin
38	Iğdır	100,00%	Etkin
40	İstanbul	100,00%	Etkin
41	İzmir	100,00%	Etkin
42	K.Maraş	100,00%	Etkin
60	Muş	100,00%	Etkin
63	Ordu	100,00%	Etkin
65	Rize	100,00%	Etkin
66	Sakarya	100,00%	Etkin
69	Sinop	100,00%	Etkin
71	Şanlıurfa	100,00%	Etkin
76	Tunceli	100,00%	Etkin
81	Zonguldak	100,00%	Etkin
75	Trabzon	99,15%	65 (0,34) 69 (0,52)
49	Kırklareli	98,01%	35 (0,01) 36 (0,10) 40 (0,04) 65 (0,66) 81 (0,18)
43	Karabük	97,20%	35 (0,07) 36 (0,23) 65 (0,48) 69 (0,12)
79	Yalova	96,48%	36 (0,33) 65 (0,73) 69 (0,03)
78	Van	95,80%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
21	Bursa	95,38%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)

İllerin Sırası	İl Adı	Skor	Etkinlik Durumu-[BENCHMARK : il sırası (% değişim)]
1	Adana	94,97%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
26	Diyarbakır	93,96%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
68	Siirt	92,63%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
59	Muğla	92,30%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
51	Kilis	92,10%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
13	Bartın	91,73%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
52	Kocaeli	89,84%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
33	Gaziantep	88,38%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
46	Kastamonu	88,09%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
72	Şırnak	86,81%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
44	Karaman	84,43%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
34	Giresun	82,74%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
57	Mardin	81,92%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
50	Kırşehir	80,89%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
7	Ankara	80,60%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
58	Mersin	80,22%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
18	Bitlis	80,11%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
2	Adıyaman	79,26%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
67	Samsun	78,92%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
27	Düzce	78,53%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
11	Aydın	77,85%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
74	Tokat	77,44%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
19	Bolu	77,01%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
31	Erzurum	76,17%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
28	Edirne	75,31%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
17	Bingöl	75,08%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
56	Manisa	75,04%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
64	Osmaniye	73,91%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
45	Kars	71,98%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
61	Nevşehir	71,98%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
48	Kırıkkale	68,43%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
62	Niğde	66,73%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
55	Malatya	66,41%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
53	Konya	66,10%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
6	Amasya	65,90%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
32	Eskişehir	63,28%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
25	Denizli	62,13%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
47	Kayseri	61,78%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
39	Isparta	60,00%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
30	Erzincan	59,20%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
29	Elazığ	59,10%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
12	Balıkesir	59,08%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
24	Çorum	58,64%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
5	Aksaray	58,26%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
77	Uşak	56,10%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
70	Sivas	56,03%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
16	Bilecik	55,99%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
22	Çanakkale	55,67%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
80	Yozgat	54,14%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
20	Burdur	53,91%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)
3	Afyon	51,80%	4 (0,26) 14 (0,22) 36 (0,28)
73	Tekirdağ	51,62%	8 (0,11) 36 (0,18) 37 (0,09) 40 (0,26) 65 (0,31)
23	Çankırı	48,53%	8 (0,62) 14 (0,23) 41 (0,06)
54	Kütahya	48,13%	14 (0,89) 35 (0,02) 36 (0,03)

Model 1 sonuçları incelendiğinde, 21 ilin skoru 100% çıkarak etkinlik sınırını oluşturan iller olmuştur. Etkin olmayan iller bu illere benzeyebilmek için benchmark değerlerine göre değişkenlerini ayarlamaları gerekecektir.

Örneğin, Trabzon ili %99,15'ile etkin olamaya en yakın ildir. Etkin olabilmek için etkinlik sınır

çizgisinde en yakın olduğu Rize ve Sinop (benchmarktaki birinci rakam il sırasını, diğeri % değerini göstermektedir) ilini örnek almıştır, buna göre girdi değerlerindeki fazlalıkları aşağıdaki Tablo 4'deki kadar azaltarak etkin hale gelebilecektir.

Diğer bir etkin olmayan il ise Kütahya'dır. Kütahya ili %48,13'ile etkin olamaya en uzak ildir. Etkin olabilmesi için Antalya, Batman ve Gümüşhane ilini örnek almıştır, buna göre girdi değerlerindeki fazlalıkları Tablo 5'deki kadar azaltarak etkin hale gelebilecektir.

Tablo 4. Trabzon ilinin etkin olabilmesi için girdilerindeki fazlalık değerleri
(In order for the province of Trabzon to be effective, the excess values in its inputs)

TRABZON İLİ GİRDİLERDEKİ FAZLALIKLARI						
Nüfus Artış Hızı (%)	Kişi Başına Gysh	Kişi Başına Gysh Artışı (%)	Bir. Enerji Tük.	Bir. Enerji Tük. / Kişi Sayısı	GES Kul.	RES Kul.
9,503	3877,869	22,960	68,290	0,108	0,000	0,02

Tablo 5. Kütahya ilinin etkin olabilmesi için girdilerindeki fazlalık değerleri (In order for the province of Kütahya to be effective, the excess values in its inputs)

KÜTAHYA İLİ GİRDİLERDEKİ FAZLALIKLARI						
Nüfus Artış Hızı (%)	Kişi Başına Gysh	Kişi Başına Gysh Artışı (%)	Bir. Enerji Tük.	Bir. Enerji Tük. / Kişi Sayısı	GES Kul.	RES Kul.
9,503	3877,869	22,960	68,290	0,108	0,000	0,02

Analiz sonucuna göre 81 ilin 21'i yani illerin %25,9 etkin durumdadır, bu etkin illeri süper etkinlik modelinden yararlanarak kendi içlerinde sıralanmış hali Tablo 6'da verilmiştir. Burada süper etkinlik skoru en yüksek olan il Antalya olup en düşük olan il ise Tunceli olarak elde edilmiştir. Bu skorlar sadece etkin olan yani etkinlik skoru %100 olan illerin kendi içerisindeki sıralamasını göstermektedir.

Tablo 6. Model 1 etkin illerin sıralaması (Model 1 ranking of active provinces)

İller	Etkinlik Değerleri	
1	Antalya	177656,39%
2	Gümüşhane	52583,67%
3	Artvin	167,99%
4	Rize	167,98%
5	İstanbul	153,18%
6	Sinop	152,00%
7	Batman	150,00%
8	Bayburt	145,96%
9	Iğdır	134,20%
10	Hakkari	131,15%
11	Ağrı	120,76%
12	Şanlıurfa	117,89%
13	Zonguldak	117,89%
14	K.Maraş	114,53%
15	Sakarya	112,97%
16	Ordu	111,25%
17	Hatay	111,15%
18	Muş	109,11%
19	İzmir	106,95%
20	Ardahan	104,78%
21	Tunceli	104,27%

Etkinlik sınırının altında olan 60 ilin etkin olabilmeleri girdilerdeki, "nüfus artış hızı, birincil enerji tüketimi, kişi başına düşen GYSH, ısıtma soğutmada yenilenebilir kaynakların kullanımı gibi seçilen girdi ve çıktı değerlerindeki fazlalıklarının azaltmaları için Tablo 3'de verilen benchmark değerlerine göre örnek aldıkları illerin yanında bulunan % benzeme oranlarının çarpılıp toplanmasıyla elde edilecek değere kendi değerlerini taşımaları gerekmektedir.

Etkinlik skoru %100 olan iller diğer etkin olmayan iller tarafından refere edilmektedir. Örneğin Batman ili etkin olmayan iller tarafından 44 kez referans alınmış ve en çok referans alınan il olmuştur, Ardahan, Artvin, Bayburt, Muş, Ordu, Şanlıurfa, Tunceli illeri ise diğer etkin olmayan iller tarafından hiç referans olarak alınmamıştır. Yani veri zarflama analizi ile oluşturulan etkinlik sınır çizgisinde yer alan

bu iller etkin olmayan ve bu çizgiye ulaşmaya çalışan iller tarafından refere edilmemişlerdir.

Etkin olmayan illerin girdilerindeki fazlalık oranlarının en yüksek olduğu iller aşağıda listelenmiştir;

- Nüfus artış hızı eşik değerini en çok geçen il “Tekirdağ”
- Kişi başına düşen GYSH miktarı sınırını en çok aşan il “Ankara”
- Kişi başına GYSH artışı en yüksek olan il “Konya”
- Enerji tüketimi girdisine göre elektriği en verimsiz kullanan il “Ankara”
- Kişi başına düşen enerji tüketimi girdisine göre elektriği en verimsiz kullanan il “Tekirdağ”
- Isıtma soğutmada yenilenebilir enerji olarak GES kullanan iller arasında en verimsiz olan “Nevşehir “
- Isıtma soğutmada yenilenebilir enerji olarak RES kullanan iller arasında en verimsiz olan “Çanakkale”
- Kişi başına düşen mesken sayısında en verimsiz olan il “Kırıkkale”

3.2. Enerji tüketim etkinlik sonuçları (Model 2) (Energy consumption efficiency results (Model 2))

Model 2’de “Enerji Tüketimi Başına Çevresel Performans Etkinliği”nde girdi değerleri kişi başına düşen milli gelir, kişi sayısı, enerji tüketimleri ve yenilenebilir enerji kaynağı çıktı değişkeni olarak ise CO₂ salınımı baz alınarak ölçülmüştür. Aslında bu modelde binalarda ve illerde kullanılan enerji parametrelerinin karbondioksit emisyonuna dönüşümünde en az kirliliği oluşturan illerin performansı değerlendirilmiştir. Bu modele göre elde edilen sonuçlar Tablo 7’de illerin etkinlik skorları olarak verilmiştir. Birinci modele benzer olarak etkin olan iller kendi aralarında süper etkinlik modelinden yararlanılarak sıralanmıştır.

Tablo 7. Model 2 illerin etkinlik değerleri (Model 2 efficiency values of provinces)

	İl Adı	Skor	Etkinlik Durumu-[BENCHMARK : il sırası (% değişim)]
7	Ankara	100,00%	ETKİN
8	Antalya	100,00%	ETKİN
15	Bayburt	100,00%	ETKİN
26	Diyarbakır	100,00%	ETKİN
34	Giresun	100,00%	ETKİN
35	Gümüşhane	100,00%	ETKİN
40	İstanbul	100,00%	ETKİN
65	Rize	100,00%	ETKİN
71	Şanlıurfa	100,00%	ETKİN
75	Trabzon	100,00%	ETKİN
78	Van	100,00%	ETKİN
69	Sinop	99,01%	75 (0,25)
31	Erzurum	98,22%	34 (0,10) 78 (0,79)
63	Ordu	96,60%	8 (0,01) 40 (0,00) 75 (0,79)
10	Artvin	94,70%	65 (0,44)
11	Aydın	93,91%	8 (0,21) 75 (0,61) 78 (0,12)
36	Hakkari	93,04%	15 (0,06) 34 (0,31)
4	Ağrı	92,61%	34 (0,44) 78 (0,12)
38	Iğdır	91,60%	15 (0,03) 34 (0,26)
14	Batman	91,47%	26 (0,18) 34 (0,52)
66	Sakarya	90,32%	75 (0,93)
41	İzmir	88,90%	8 (0,57) 40 (0,26) 75 (0,05)
17	Bingöl	87,51%	15 (0,33) 34 (0,31)
59	Muğla	87,04%	8 (0,34) 78 (0,48)
46	Kastamonu	86,09%	34 (0,28) 65 (0,52)
58	Mersin	85,59%	8 (0,47) 75 (0,42)
74	Tokat	84,14%	75 (0,24) 78 (0,41)
9	Ardahan	84,12%	15 (0,06) 34 (0,14)
60	Muş	81,43%	15 (0,06) 34 (0,49)
81	Zonguldak	79,58%	75 (0,62)
45	Kars	79,30%	15 (0,31) 34 (0,30)
37	Hatay	79,29%	8 (0,17) 40 (0,05) 75 (0,39)
12	Balıkesir	77,64%	8 (0,24) 75 (0,55)
76	Tunceli	77,43%	15 (0,12) 34 (0,12)

	İl Adı	Skor	Etkinlik Durumu-[BENCHMARK : il sırası (% değişim)]
24	Çorum	75,76%	75 (0,01) 78 (0,69)
1	Adana	72,92%	8 (0,61) 40 (0,01)
67	Samsun	71,56%	8 (0,16) 40 (0,01) 75 (0,48)
79	Yalova	70,28%	34 (0,55) 75 (0,12)
6	Amasya	66,58%	34 (0,61) 78 (0,02)
50	Kırşehir	66,43%	15 (0,36) 34 (0,39)
48	Kırıkkale	65,48%	34 (0,41) 78 (0,08)
18	Bitlis	65,45%	15 (0,09) 34 (0,39)
27	Düzce	65,14%	26 (0,00) 34 (0,34) 65 (0,34)
68	Siirt	64,88%	15 (0,12) 34 (0,42)
55	Malatya	60,19%	8 (0,04) 75 (0,37) 78 (0,20)
28	Edirne	59,20%	34 (0,02) 75 (0,23) 78 (0,25)
57	Mardin	59,11%	26 (0,42) 34 (0,21)
21	Bursa	58,24%	8 (0,09) 40 (0,15) 75 (0,39)
72	Şırnak	58,19%	26 (0,03) 34 (0,49)
39	Isparta	56,67%	75 (0,24) 78 (0,26)
43	Karabük	56,42%	34 (0,38) 75 (0,05)
70	Sivas	56,03%	8 (0,01) 75 (0,52)
80	Yozgat	55,63%	34 (0,32) 75 (0,14) 78 (0,07)
56	Manisa	55,52%	8 (0,29) 75 (0,25)
2	Adıyaman	55,36%	8 (0,02) 75 (0,10) 78 (0,43)
47	Kayseri	54,33%	8 (0,22) 75 (0,33)
61	Nevşehir	53,53%	26 (0,12) 34 (0,26)
13	Bartın	52,58%	34 (0,17) 65 (0,26)
25	Denizli	52,37%	8 (0,17) 75 (0,34)
19	Bolu	50,52%	26 (0,04) 34 (0,44) 35 (0,03)
29	Elazığ	50,47%	8 (0,00) 75 (0,47)
54	Kütahya	49,96%	8 (0,01) 75 (0,46)
3	Afyon	47,68%	8 (0,05) 75 (0,37) 78 (0,07)
32	Eskişehir	46,88%	8 (0,12) 75 (0,33)
33	Gaziantep	46,64%	8 (0,41) 40 (0,01)
30	Erzincan	46,38%	15 (0,08) 34 (0,40)
42	K.Maraş	44,86%	8 (0,01) 40 (0,03) 75 (0,33)
51	Kilis	43,65%	15 (0,11) 34 (0,31)
23	Çankırı	42,12%	15 (0,11) 34 (0,29)
53	Konya	40,25%	8 (0,32) 40 (0,04)
62	Niğde	40,21%	26 (0,19) 34 (0,18)
5	Aksaray	38,96%	26 (0,18) 34 (0,23)
20	Burdur	38,33%	8 (0,01) 34 (0,31) 75 (0,02)
22	Çanakkale	38,31%	8 (0,08) 75 (0,28)
52	Kocaeli	36,43%	8 (0,01) 40 (0,08) 75 (0,32)
77	Uşak	31,56%	8 (0,02) 75 (0,28)
49	Kırklareli	31,51%	8 (0,00) 40 (0,01) 75 (0,30)
64	Osmaniye	24,42%	8 (0,11) 75 (0,00) 78 (0,14)
44	Karaman	23,87%	34 (0,01) 75 (0,21) 78 (0,02)
73	Tekirdağ	18,91%	8 (0,00) 40 (0,03) 75 (0,18)
16	Bilecik	16,18%	8 (0,01) 75 (0,14)

Bu modele göre 81 ilin 11 tanesi etkin iken geriye kalan 70 ilin etkinlik sınırından uzak olduğu görülmüştür. Etkin olmayan illerin etkin olabilmeleri için kendilerine referans aldıkları iller ve referans alma oranları benchmarkta verilmiştir. Trabzon ili etkin olmayan iller tarafından 38 kez referans alınarak en çok referans alınan il olmuştur, Ankara ve Şanlıurfa ili ise etkin olmayan iller tarafından hiç referans alınmamıştır.

Sinop ili %99,01'ile etkin olamaya en yakın ildir. Etkin olabilmek için sadece Trabzon ilini örnek almıştır ve buna göre girdi değerlerindeki Benchmarkta verilen oranlarda azalttığında Tablo 8'deki değerlere ulaşması durumunda etkin hale gelebileceği görülmektedir.

Tablo 8. Sinop ilinin etkin olabilmesi için girdilerindeki fazlalık değerleri
(In order for the province of Sinop to be effective, the excess values in its inputs)

SİNOP İLİ GİRDİLERDEKİ FAZLALIKLARI						
Nüfus Artış Hızı (%)	Kişi Başına Gysh	Kişi Başına Gysh Artışı (%)	Bir. Enerji Tük.	Bir. Enerji Tük. / Kişi Sayısı	GES Kul.	RES Kul.
9,503	3877,869	22,960	68,290	0,108	0,00	0,02

Benzer olarak Bilecik ili %16,18 ile etkin olamaya en uzak ildir. Etkin olabilmesi için sadece Trabzon ve Antalya ilini örnek almıştır, buna göre girdi değerlerindeki fazlalıkları aşağıdaki Tablo 9'daki kadar azaltarak etkin hale gelebilir;

Tablo 9. Bilecik ilinin etkin olabilmesi için girdilerindeki fazlalık değerleri
(In order for the province of Bilecik to be effective, the excess values in its inputs)

BİLECİK İLİ GİRDİLERDEKİ FAZLALIKLARI						
Nüfus Artış Hızı (%)	Kişi Başına Gysh	Kişi Başına Gysh Artışı (%)	Bir. Enerji Tük.	Bir. Enerji Tük. / Kişi Sayısı	GES Kul.	RES Kul.
11,409	9091,105	28,493	144021,229	0,748	0,185	0,294

İllerin %13,6 etkin durumdadır, etkin illeri süper etkinlik modelinden yararlanarak kendi aralarında sıralanmış hali Tablo 10'da verilmiştir. Buradan Antalya ilinin enerji göstergelerini etkin biçimde kullanarak CO2 emisyonu bakımından daha az çevreye zarar verdiği sonucu çıkmıştır. Benzer olarak Tablo 10'da verilen bütün iller emisyon üretiminde enerji göstergelerini daha etkin kullanmışlardır.

Tablo 10. Model 2 etkin illerin sıralaması (Model 2 ranking of active provinces)

İLLER	ETKİNLİK YÜZDELERİ
Antalya	62990,09%
Gümüşhane	10418,80%
İstanbul	1152,92%
Rize	297,98%
Trabzon	258,16%
Diyarbakır	227,07%
Ankara	183,07%
Şanlıurfa	168,78%
Giresun	157,11%
Van	116,65%
Bayburt	103,29%

Etkinlik sınırının altında olan 70 ilin etkin olabilmeleri için girdilerdeki, "birincil enerji tüketimi, kişi başına düşen GYSH, ısıtma soğutmada yenilenebilir kaynakların kullanımı" fazlalıklarını azaltmaya ihtiyaçları vardır. Girdilerdeki fazlalık oranlarının en yüksek olduğu iller aşağıda listelenmiştir;

- Nüfus artış hızı eşik değerini en çok geçen il Tekirdağ
- Kişi başına düşen GYSH miktarı sınırını en çok aşan il Kocaeli
- Kişi başına GYSH artışı en yüksek olan il Çankırı
- Enerji tüketimi girdisine göre elektriği en verimsiz kullanan il Kocaeli,
- Kişi başına düşen enerji tüketimi girdisine göre elektriği en verimsiz kullanan il Bilecik,
- Isıtma soğutmada yenilenebilir enerji olarak GES kullanan iller arasında en verimsiz olan Nevşehir'dir.

Tablo 11'de her iki Model için de etkin olan iller verilmiştir. Antalya, Bayburt, Gümüşhane, İstanbul, Rize ve Şanlıurfa illeri iki modelde Bu çalışma, 81 ildeki meskenlerin enerji verimliliği kapsamında etkinliklerinin değerlendirilmesi için 2020 yılındaki mesken sayısı, kişi sayısı, kişi başına düşen GYSH enerji tüketimleri, yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı ve çevre verileri kullanılarak Veri Zarflama Analizi ve Süper Etkinlik Modelleri ile etkinlik performansları ölçülmüştür. Ölçülen performans göreceli etkinliği oluşturmakta olup nonparametrik bir çalışmadır. Uygulamada EMS (sürüm 1.3) paket programı kullanılmıştır. Türkiye'deki illerin enerji göstergelerini enerji verimliliği açısından etkin kullanıp kullanmadıkları test edilmiştir. Etkin olmayan kullanımlar için ise seçilen enerji göstergelerini hangi seviyeye taşımaları gerektiği ortaya konulmuştur. de etkin oldukları gözlemlenmiştir.

Tablo 11. Model 1 ve model 2 etkin illerin sıralaması (Model 1 and model 2 ranking of active provinces)

İLLER	MODEL 1	MODEL 2
Ağrı	X	
Ankara		X
Antalya	X	X
Ardahan	X	
Artvin	X	
Batman	X	
Bayburt	X	X
Diyarbakır		X
Giresun		X
Gümüşhane	X	X
Hakkari	X	
Hatay	X	
Iğdır	X	
İstanbul	X	X
İzmir	X	
K.Maraş	X	
Muş	X	
Ordu	X	
Rize	X	X
Sakarya	X	
Sinop	X	
Şanlıurfa	X	X
Trabzon		X
Tunceli	X	
Van		X
Zonguldak	X	

4. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışma, 81 ildeki meskenlerin enerji verimliliği kapsamında etkinliklerinin değerlendirilmesi için 2020 yılındaki mesken sayısı, kişi sayısı, kişi başına düşen GYSH enerji tüketimleri, yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı ve çevre verileri kullanılarak Veri Zarflama Analizi ve Süper Etkinlik Modelleri ile etkinlik performansları ölçülmüştür. Ölçülen performans göreceli etkinliği oluşturmakta olup nonparametrik bir çalışmadır. Uygulamada EMS (sürüm 1.3) paket programı kullanılmıştır. Türkiye'deki illerin enerji göstergelerini enerji verimliliği açısından etkin kullanıp kullanmadıkları test edilmiştir. Etkin olmayan kullanımlar için ise seçilen enerji göstergelerini hangi seviyeye taşımaları gerektiği ortaya konulmuştur.

Kısaltmalar (Abbreviations)

- BCC : Banker, Charnes ve Cooper
- CCR : Charnes, Cooper ve Rhodes
- CO₂ : Karbon dioksit
- EMS : Veri zarflama analizi programı
- EKB : Enerji kimlik belgesi
- ÇŞB : Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
- EPDK : Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
- GES : Güneş Enerji Santrali
- GYSH : Gayri safi yurt içi hasıla
- RES : Rüzgar enerji santrali
- OECD :Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
- TÜİK : Türkiye İstatistik Kurumu
- VZA : Veri zarflama analizi

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] A. Yıldız, S. Akgül ve S. Güvercin, "Sanayide enerji verimliliği ve uygulamalar," *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, cilt 7, sayı 1, ss. 16-22, 2018.
- [2] G. Demirsoy ve A. Sözen, "Binalarda enerji verimliliğinin toplam faktör etkinliği," *Politeknik Dergisi*, doi:10.2339/politeknik.886923
- [3] N. Yılkırkan ve H. Doğan, "Türkiye'nin Enerji Verimliliği Potansiyeli ve Projeksiyonu", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, cilt 3, sayı 1, ss. 375-384, 2015.
- [4] Keskin T., Güven A., "Türkiye'nin Enerji Görünümü," *mm.org.tr*, [Online]. Available: https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/TEG-2020-15_%20Enerji%20Verimlili%C4%9Fi_T%C3%BClin%20Keskin%20Balpaslan%20G%C3%BCven.pdf. [Accessed: Oct. 8, 2022:]
- [5] Epdk, "EPDK Temmuz 2020 (Elektrik Piyasası Sektör Raporu)," *epdk.org.tr*, [Online]. Available: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/elektrikaylik-sektor-raporlar>. [Accessed: Sept. 3, 2022:]
- [6] M. Özgür, "Enerji Etkinliğinin Ölçümünde Veri Zarflama Analizi Modellerinin Kullanımı," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- [7] K. Yiğit, "BEP-TR Yazılımı İle Konutlarda Enerji Kimlik Belgesi Uygulaması Ve Aydınlatmaya Yönelik Tüketilen Enerjinin Tasarruf Potansiyelinin Belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
- [8] M.N. Morgül, "Understanding Residential Electricity Consumption Considering Efficiency Policies And The Impact On The Electricity System," MSc Thesis, Istanbul Şehir University Institute of Science and Technology, Istanbul, 2014.
- [9] C. Woo, Y. Chung, D. Chun, H. Seo and S. Hong, "The static and dynamic environmental efficiency of renewable energy: A Malmquist index analysis of OECD countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 367-376, 2015.
- [10] S.P. Türkoğlu, "OECD Ülkelerinin Enerji Etkinliklerinin ve Dinamiklerinin İncelenmesi," Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, İşletme Anabilim Dalı, Ankara, 2016.
- [11] İ. Kocak, "Türkiye'deki İllerin Elektrik Tüketimlerinin Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi," Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 2018.
- [12] G. Demirsoy, "Binalarda Enerji Verimliliğinin Etkinlik Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2021.
- [13] A. Okursoy, D. Tezsürücü, "Veri zarflama analizi ile görelî etkinliklerin karşılaştırılması: türkiye' deki illerin kültürel göstergelerine ilişkin bir uygulama," *Yönetim Ve Ekonomi Dergisi*, cilt. 21, sayı 2, sayfa. 1-18, 2014. Doi :10.18657/yecbu.92031
- [14] Dönmezçelik Ö., "Türkiye'deki Elektrik Dağıtım Şirketlerinin Etkinliğinin Veri Zarflama Analizi İle İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2014.
- [15] Z. Sarı, "Veri zarflama analizi ve bir uygulama," Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [16] S. Uludağ, M. Kılıç, "Veri zarflama analizi ile maliyet performansı ölçümü: Bıst tekstil sektöründe bir uygulama," *Business & Management Studies: An International Journal*, cilt 8, sayı 4, 2020. doi:10.15295/bmij.v8i4.1600

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Experimental and Theoretical Investigation of the Effect of Gash Rake Angle on Drilling AISI 4140 Tempered Steel

Yafes Cavus^{a*}, Sukran Katmer^b, Ismail Tekaut^c, Secil Kurt Arifoglu^d, Harun Gokce^e, Ulvi Seker^f

Submitted: 05.09.2022 Revised: 29.10.2022 Accepted: 31.12.2022 doi:10.30855/gmbd.0705046

ABSTRACT

In this study, drilling of AISI 4140 tempering steel with different gash rake angle the effects of the gash rake angle on the thrust force and drilling moment were investigated by experimental and FEM supported virtual simulation studies, and surface roughness was investigated experimentally. In the experiments, monolithic solid carbide drill are used that has +10°, 0°, -10° gash rake angle and diameter with 6,8mm. Experimental design was developed based on three different drill gash rake angle, cutting speed and feed rate with using Minitab 18 statistical software and Taguchi L9 experiment design method. Experiments have been carried out on AISI 4140 tempering steel is widely used in the manufacturing industry and can be purchased commercially. Variance Analysis (ANOVA) was applied to evaluate the test results and the effects of the independent variables (Ya: slit saw angle, Vc: cutting speed, fn: feed amount) on the pushing force during hole drilling were evaluated according to significance value of 0.05. When the test results are examined, it is seen that the drill gash rake angle does not have a significant effect on the thrust force, drilling moment and surface roughness in drilling of AISI 4140 tempered steel, but it has a 63.78% effect on the thrust force. In the Finite Element supported virtual simulation studies, it is seen that it gives guiding results for the thrust force and drilling moment in drilling of AISI 4140 tempered steel with different drill gash rake angles.

AISI 4140 İslah Çeliğinin Delinmesinde Yarıklı Talaş Açısının Etkisinin Deneysel ve Teorik Araştırılması

ÖZ

Bu çalışmada farklı yarıklı talaş açısına (gash rake angle) sahip matkaplar ile AISI 4140 ıslah çeliğinin delinmesinde yarıklı talaş açısının itme kuvveti ve delme momenti üzerine etkileri deneysel ve FEM destekli sanal simülasyon çalışmaları ile yüzey pürüzlülüğü ise deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde +10°, 0°, -10° yarıklı talaş açısına sahip 6,8 mm çapında yekpare karbür kaplamalı matkaplar kullanılmıştır. Deney tasarımı Minitab 18 istatistik yazılımı Taguchi L9 deney tasarımı kullanılarak üç farklı matkap yarıklı talaş açısı, kesme hızı ve ilerleme miktarı esas alınarak oluşturulmuştur. Deneyler imalat sanayisinde yaygın olarak kullanılan ve ticari olarak temin edilebilen AISI 4140 ıslah çeliği üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarını değerlendirmek amacıyla Varyans Analizi (ANOVA) uygulanmış olup bağımsız değişkenlerin (Ya: yarıklı talaş açısı, Vc: kesme hızı, fn: ilerleme miktarı) delik delme sırasında meydana gelen itme kuvveti üzerine etkileri 0,05 anlamlılık değerine göre değerlendirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde AISI 4140 ıslah çeliğinin delinmesinde matkap yarıklı talaş açısının itme kuvveti, delme momenti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı görülse de itme kuvveti üzerinde %63,78'lik bir etkiye sahiptir. Yapılan Sonlu Elemanlar destekli sanal simülasyon çalışmalarında ise farklı matkap yarıklı talaş açılarıyla AISI 4140 ıslah çeliğinin delinmesinde itme kuvveti ve delme momenti için yol gösterici sonuçlar verdiği görülmektedir.

Keywords: Drilling, Drill, Gash Rake Angle, Thrust Force, Drilling Torque.

^{a*} Hacettepe University,
Başkent OSB Vocational School of
Technical Sciences,
Dept. of machinery and metal
technologies
06909 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-6102-8838
e mail: yafescavus@hacettepe.edu.tr

^b Gazi University,
Graduate School of Natural and Applied
Sciences,
Dept. of manufacturing engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-3641-2328

^c Gazi University,
Vocational School of Technical
Sciences,
Dept. of machinery and metal
technologies
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8655-0422

^d Karcan Cutting Tools Company
Dept. of R&D
26610-Eskişehir-Türkiye
Orcid: 0000-0003-0831-8236

^e Gazi University,
Faculty of Technology,
Dept. of industrial design engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-2702-0111

^f Gazi University,
Faculty of Technology,
Dept. of manufacturing engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-6455-6858

*Corresponding author:
yafescavus@hacettepe.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Delme,
Matkap, Yarıklı Talaş Açısı, İtme
Kuvveti, Delme Momenti

1. Giriş (Introduction)

Delik delme işlemleri, talaş kaldırma işlemleri içerisinde büyük bir öneme sahiptir ve metal işleme süreçlerinin yaklaşık %25'ini oluşturmaktadır. Talaşlı imalat yöntemiyle üretimde kesici takım geometrisi, talaşın ideal kesme kuvvetlerinde kaldırılmasında, kırılmasında ve kesme bölgesinden uzaklaştırılmasında kritik öneme sahiptir. Kesici takım geometrisi, kesme şartlarını, kesme kuvvetlerini, takım ömrünü ve işleme kalitesini belirleyen karmaşık bir geometridir ve işlemin verimi belirler [1-3].

İlerleme miktarı, delik delmede talaş oluşumu ve güç tüketiminde ve elde edilen deliğin geometrik toleranslarda en önemli belirleyici parametredir. Yüksek ilerleme miktarı, çıkan talaşın helis kanallarında daha kolay tahliye edilmesi ve delik delme süresini azaltması gibi olumlu etkiler sağlarken, düşük delik kalitesi gibi olumsuz bir etkiye neden olmaktadır. Diğer taraftan düşük ilerleme miktarı, talaş kontrolünün zorlaşması ve talaş yüzeyinde aşınmalar ile kesici kenarda oluşan talaş yığılmalarıyla takım ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı yüzey pürüzlülüğü, çaptan sapma, dairesellik, silindiriklik ve diklik gibi elde edilen delik kalitesinin tayininde belirleyici çıktı parametreleri olumsuz yönde etkilemektedir [4-7]. Uygun olmayan kesme parametreleri bu olumsuzluklara sebep olan tek etken değildir. İdeal matkap geometrisi ve ideal kesme parametrelerinin kombinasyonu en iyi kesme şartlarını sağladığından, matkap geometrisinin de iş parçası malzemesi özelliklerine uygun olması gerekmektedir [8].

Matkap geometrisi, delme sürecinde, matkabın iş parçası malzemesi yüzeyinde konumlandırılması ve batması, kesme kuvvetlerinin azaltılması, talaşın kırılması, talaşın tahliyesi, matkabın delik eksenini takibi, titreşim ve takım ömrü gibi parametrelerde belirleyici faktördür [9]. Matkabın uç bölgesi, iş parçasıyla ilk temas eden ve işlem süresince talaş kaldıran kısım olduğu için matkap geometrisi ve uç açıları kritik öneme sahiptir. Diğer taraftan, yeterli uzunlukta olmayan bir enine kesici kenarlı matkabın, işleme esnasında parça yüzeyinde konumlandırılması oldukça güçleşmektedir. Bu problemi gidermek için matkap ucuna, matkap yarığı (split/gash) olarak adlandırılan ek yüzeyler oluşturulmaktadır. Bu yüzeylerin amacı, enine kesici kenarın ksalmasını sağlayarak, ikincil kesici kenarın pozitif talaş açılı olarak oluşmasını sağlamaktır [10].

Bir başka problem ise; uygun olmayan yarık talaş açısı, matkap uç bölgesinde talaş sıkışmasına ve kesme kuvvetlerinde artışa neden olmakta ve buna bağlı olarak, matkapta hızlı aşınmaya, aşırı kesme kuvvetlerine, delik kalitesinde kötüleşme gibi problemlere yol açmaktadır. Yarık talaş açısı, enine kesici kenarın kaldırdığı talaşın yarık yüzeyine sürtünme süresini belirlemede ve bu talaşı helis kanalına yönlendirmede kritik görev yapmaktadır. Delik delme işleminin kapalı alanda gerçekleşmesinden dolayı kesme sıcaklığının büyük bir bölümünün delik içerisinde dağılması ve talaşlı imalatta kesme sıcaklığının yaklaşık %70-80'ninin talaşla atılıyor olması, yarık talaş açısının talaş sıkışmasını önlemek ve matkap uç bölgesinden talaşın tahliyesinde oldukça önemli görev yaptığına işaret etmektedir [11,12].

Talaşlı imalat işlemlerinin maliyetinin büyük bir kısmını kesici takım oluşturmaktadır. Bu sebeple işlenecek malzemeye ve kullanılacak operasyona uygun kesici takım geometrisi ile malzemesi seçimi önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Kesmenin sanal ortamlarda yapıldığı Sonlu Elemanlar Analizleri (FEA) ve deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak kurulan matematiksel modeller, istenilen kalitede ürün üretilebilmesi, uygun kesici takım geometrisi seçilmesi ve kesici takım ile hammadde israfının ortadan kaldırılması için son yıllarda talaşlı imalat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır [13,14].

Delik delme sürecinde işleme performansına etki eden faktörlerden kesici takım türü ve uç geometrisi, iş parçası malzemesi, delik çapı, tezgâh rijitliği, soğutma sıvısı, kesme hızı ve ilerleme gibi kesme parametreleri ile ilgili çeşitli araştırmaların yapıldığı tespit edilmiş olup takım ömrü ve matkap uç geometrisi üzerine yapılan çalışmaların çokluğu dikkat çekmektedir [10-24]. Bunlar, ağırlıklı olarak, matkap uç geometrisinin kesme kuvveti üzerindeki etkisini ortaya koyan ve optimum kesme şartlarını belirlemek için matkap uç geometrisindeki değişiklikleri inceleyen çalışmaları kapsamaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda, özellikle uç geometrisine bağlı olarak, kesme kuvveti ve moment ile ilgili çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir [10-16]. Takım ömrünü belirleyen, aşınma ve aşınmaya sebep olan kesme kuvvetleri ve momentleriyle ilgili yapılan çalışmalarda, uç geometrisi haricinde kesme hızı, ilerleme miktarı, delik çapı, tezgâh rijitliği ve soğutma sıvısı gibi faktörlerin etkileri de çeşitli deneysel ve teorik çalışmalarla incelenmiştir [17-24]. Kaplama uygulaması ve matkap uç geometrisindeki modifikasyonların matkabın aşınması üzerinde en belirgin etkiye sahip parametreler oldukları bu çalışmalarla tespit edilmiştir [15,18, 26].

Geometrik unsurların delme işlemindeki rolü detaylı incelenmiş olup, matkap geometrisi çalışılırken, yarık talaş açısının ihmal edilen bir parametre veya geometrik unsur olduğu dikkat çekmektedir. Yapılan bu çalışma ile, talaşlı imalatta önemli bir yeri olan matkapla delik delme işlemlerinde, matkap geometrisini oluşturan matkap yarığı ve yarık talaş açısının (gash rake angle), AISI4140 islah çeliği için optimize edilmesi amaçlanmıştır.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

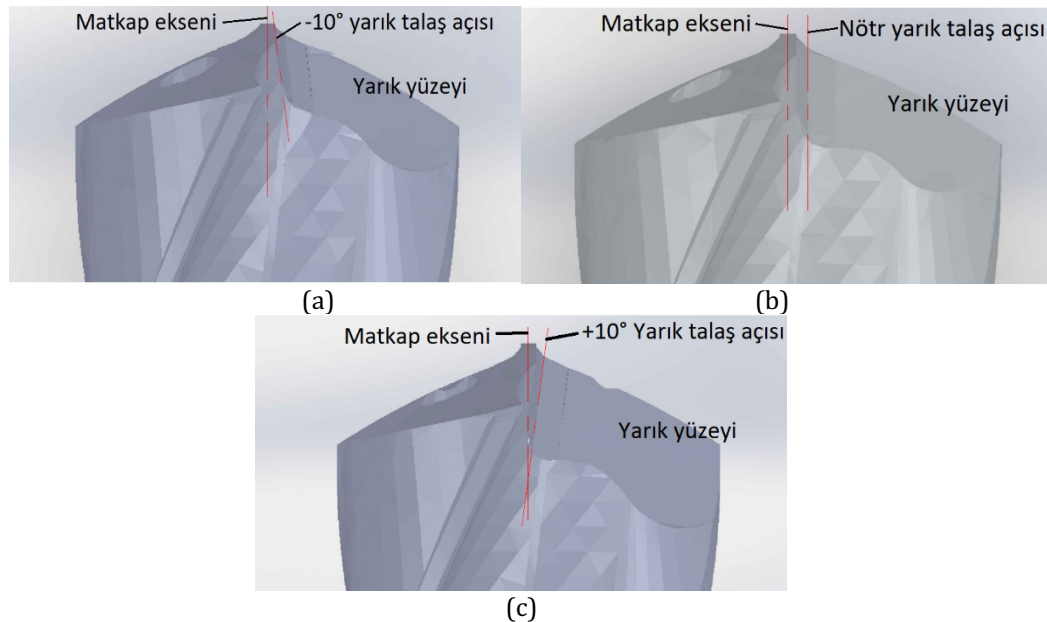
2.1. İş Parçası ve Kesici Takımlar (Workpiece and Cutting Tools)

Bu çalışmada 140x140x20 mm boyutlarında AISI 4140 ıslah çeliğinden hazırlanmış deney numuneleri kullanılmıştır. Numuneler altlarına dört adet burç konularak dinamometre üzerine civata ile bağlanmıştır. AISI 4140 ıslah çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Deney numunesi üzerinde seri delik delme işlemi uygulanmıştır. Her bir deney parametresi kombinasyonu yüz defa tekrarlanmış olup, delme sırasında meydana gelen ısıdan bir sonraki deliğin etkilenmemesi için yapılan delik yerleşim planında birer delik atlanarak delikler delinmiştir.

Tablo 1. AISI 4140 ıslah çeliğinin kimyasal kompozisyonu, % (Chemical composition of AISI 4140 tempered steel, %)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0,45	0,1	0,60	0,04	0,04	Kalan

Deneysel çalışmalarda, iyi aşınma direncinden dolayı yüksek kesme hızlarında dahi iyi performans sergileyen iki ağızlı helisel, split uçlu, 6,8 mm çaplı, 138° uç açılı, içten soğutma kanallı ve TiAlN kaplamalı yekpare sinterlenmiş karbür matkaplar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan matkapların geometrik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 1'de 3 farklı yarık talaş açısının uç geometrisi üzerinde gösterimi verilmiştir.



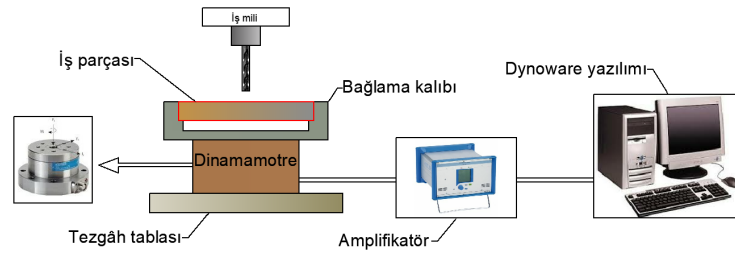
Şekil 1. (a) -10°; (b) 0°; (c) +10° Yarık Talaş Açısı (Gash Rake Angle).

Tablo 2. Tasarlanan takımların geometrik özellikleri (Geometric features of designed drill bit).

Takım Geometrisi	Matkap çapı	Sap çapı	Uç açısı	Yarık batma açısı	Yarık talaş açısı	Radyal ağız açısı	Öz kalınlığı
Geometri 1					+10°		
Geometri 2	6,8 mm	8 mm	138°	50°	0°	55°	0,264 mm
Geometri 3					-10°		

2.2. Takım Tezgâhı ve Kuvvet Ölçümü (Machine Tool and Force Measurement)

Deneysel çalışmalar JOHNFOR D VMC-550, ISO formatlı programlanabilir FANUC kontrol ünitesi CNC dik işleme tezgâhında yapılmıştır. Tezgâhın en yüksek devri 6000 dev/dk olup ölçü hassasiyeti 0,001mm'dir. Belirlenen kesme hızlarında tezgâhın maksimum devrine yakın çalışılacağından ve içten soğutma sistemi gerektiği için, içten soğutma sistemine sahip GissTech marka yüksek hız kafası kullanılmıştır. Yüksek hız kafası sürekli çalışmada 24000 dev/dk, kısa çalışma sürelerinde ise 30000 dev/dk hızlara çıkabilirken, tezgâh çıkış devrini 4,8 kat arttırmaktadır.



Şekil 2. Deney düzeneği şematik gösterimi (Schematic representation of the experimental setup)

Delme operasyonu sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve delme momenti dakikada 10000 ölçüm yapabilen Kistler 9272a çok amaçlı dinamometre ile ölçülmüştür. Dinamometreden alınan ölçümler, yine sekiz kanallı Kistler Amplifikatör ile yükseltilerek bilgisayara aktarılmış ve Kistler Dynamware yazılımı ile veriler değerlendirilerek itme kuvveti (Fz) ve delme momenti (Mz) değerleri alınmıştır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.

2.3. Kesme Parametreleri (Cutting Parameters)

Çalışmada özgün olarak üç farklı yarık talaş açısı (+10°, 0°, -10°) ile üç farklı kesme hızı (80, 100, 120 m/dk) ve ilerleme miktarı (0,15; 0,25; 0,3 mm/dev) kullanılarak üç farklı seviyeli üç kontrol faktörü (3x3x3) kullanılmıştır. Deney tasarımı kullanılan bağımsız değişkenler ve kontrol faktörleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 3’teki faktörler göz önünde bulundurularak Minitab istatistik yazılımı kullanılarak Taguchi L9 ortogonal (Tablo 4) dizini seçilerek deney tasarımı yapılmıştır.

Tablo 3. Deney parametreleri ve seviyeleri (Experiment parameters and levels).

Faktörler	Birim	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Kesme hızı	m/dk	80	100	120
Yarık talaş açısı	° (derece)	+10	0	-10
İlerleme	mm/dev	0,15	0,25	0,3

Tablo 4. Taguchi L9 ortogonal deney tasarımı (Taguchi L9 orthogonal experiment design)

	Vc(m/dk)	Ya(°)	fn(mm/dev)
L1	80	+10	0,15
L2	80	0	0,25
L3	80	-10	0,3
L4	100	0	0,15
L5	100	-10	0,25
L6	100	+10	0,3
L7	120	-10	0,15
L8	120	+10	0,25
L9	120	0	0,3

2.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü (Surface Roughness Measurement)

Ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri Mitutoyo SurfTest SJ-410 portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Kesim uzunluğu (λ_c) 0,8 mm, örnekleme tekrar sayısı (n) 5 ve yanal uzunluk (Lt) 5,6mm parametreleri kullanılmıştır. Her deney için delinen deliklerden giriş bölgesinden dört, çıkış bölgesinden dört ölçüm alınarak bu değerlerin ortalaması deliklerin giriş bölgesi ve çıkış bölgesi yüzey kaliteleri bu değerler dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

2.5. Sanal Simülasyon Çalışması (Virtual Simulation Study)

Nümerik analizler, itme kuvveti ve delme momenti sonuçlarının önceden kestirilebilmesi için talaş kaldırma modellerine odaklanmış bir FEM destekli sanal simülasyon yazılımı olan Third Wave AdvantEdge® programı ile yapılmıştır. Yazılım güncellenmiş Lagrangian eşitliklerinden faydalanmakta olup adaptif yeniden ağ örme tekniklerini kullanmaktadır. FEM destekli sanal simülasyon çalışmalarında iş parçası malzemesi olarak yazılım kütüphanesinde bulunan AISI 4140 ıslah çeliği tercih edilmiştir. İş parçası genişlik ve uzunluk ölçülerinin matkap çapından en az 2 kat fazla olması gerektiğinden 15x15x20 mm olarak yazılıma tanıtılmıştır. Kullanılan matkapların tasarımları STL formatında kaydedilerek Third Wave AdvantEdge yazılımına işlenmiştir. Takımın malzemesi

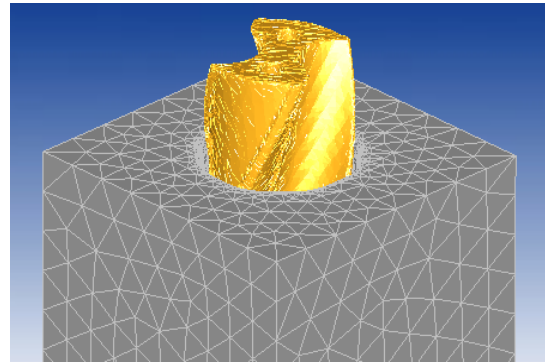
program malzeme kütüphanesinde bulunduğundan buradaki malzeme takım malzemesi olarak kullanılmış olup, AlTiN kaplama malzemesi de yine program kütüphanesinde bulunmaktadır. Ayrıca kaplama kalınlığının 3µm olarak tanıtımı yapılmıştır. Minimum element boyu miktarı doğru sonuçlar alınabilmesi için yazılımın tavsiyesiyle ilerleme miktarının yarısı olarak kabul edilmiştir. Kesme parametreleri yapılan Taguchi L9 deney tasarımına göre her bir analize tanıtılmıştır. FEM destekli sanal simülasyon çalışmalarında, sürtünme kat sayısının kuvvet ve moment sonuçlarının doğru hesaplanmasında önemli bir rolü vardır. Yazılımda Coulomb sürtünme modeli kullanılmaktadır. Bu model:

$$F_f = \mu F_n \quad (1)$$

Eşitliği ile ifade edilmektedir. Kesici takım üreticisinin paylaşmış olduğu 0,35 sürtünme katsayısı FEM destekli sanal simülasyon çalışmalarında kullanılmıştır. Sonlu elemanlar destekli sanal simülasyon çalışmalarında kullanılan ağ yapısı parametreleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Ağ yapısı parametreleri (Network structure parameters)

Kesici takım parametreleri	Değer
Minimum eleman boyutu	0,05 mm
Maksimum eleman boyutu	1 mm
Kesici takım dönme açısı	360°
İş parçası parametreleri	Değer
İş parçası boyutu	15x15x20mm
Minimum eleman boyutu	0,075 mm
Maksimum eleman boyutu	2 mm
Delik başlangıç derinliği	15 mm
Başlangıç sıcaklığı	20 °C



Analizlerin sonucunda, her üç ekseninde meydana gelen kesme kuvvetleri F_x , F_y , F_z (N), dönme momenti M_z (Nm) ve verileri elde edilmiştir. Veriler *.txt dosyası olarak alınmış olup Matlap yazılımında delinebilirliğin belirlenmesinde önemli rol oynayan itme kuvveti (F_z) ve delme momenti (M_z) değerlerinin ortalamaları çıkarılmıştır.

3. Bulgular Ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmada farklı yarık talaş açısına sahip matkaplar ile AISI 4140 ıslah çeliğinin delinmesinde kesme parametrelerinin ve matkap yarık talaş açısının yüzey pürüzlülüğü, itme kuvveti ve delme momenti üzerine etkisi deneysel, istatistiksel ve sanal simülasyon analizleriyle incelenmiştir.

3.1. İtme Kuvvetinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Thrust Force)

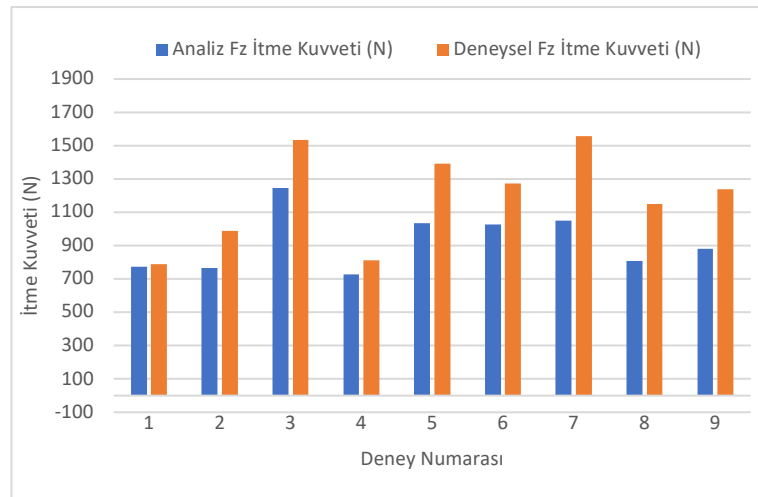
AISI 4140 ıslah çeliğinin deneysel olarak delinmesinden ve FEM destekli sanal simülasyon çalışmalarından elde edilen itme kuvveti sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6. incelendiğinde FEM destekli sanal simülasyon çalışmalarından elde edilen itme kuvveti değerlerinde L1 numaralı deneyin, deneysel çalışmadan elde edilen veriyle %98,36 oranında doğru sonuç verdiği görülmektedir. En düşük doğruluk oranının %67,72 ile L7 numaralı analizden elde edildiği görülmektedir. Yapılan analizin itme kuvveti sonuçları hakkında önemli bir sonuç verdiği görülmektedir.

Deneysel çalışmadan elde edilen itme kuvvetlerine bakıldığında -10° yarık talaş açısına sahip matkaplarla yapılan çalışmalarda daha yüksek çıktığı görülmektedir. Çalışmanın öngörüsünde negatif yarık talaş açısının çıkan talaşın eğrilik yarıçapını küçülteceği dolayısıyla itme kuvvetinin artacağı yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar bu öngörüü doğrulamaktadır. Ayrıca ilerleme kuvvetinin artmasıyla da itme kuvvetinin arttığı literatürde yapılan çalışmalarda belirtilmektedir [9,12,22].

Tablo 6. İtme kuvveti için deneysel ve FEM destekli sanal simülasyon çalışması sonuçları (Experimental and FEM supported virtual simulation study results for thrust force)

Deney No	Analiz Fz İtme Kuvveti (N)	Deneysel Fz İtme Kuvveti (N)	% Yaklaşım oranı
1	774,63	787,55	98,36
2	767,76	990,62	77,50
3	1246,75	1532,64	81,35
4	726,79	813,16	89,38
5	1033,00	1390,91	74,27
6	1026,53	1272,61	80,66
7	1051,42	1557,20	67,52
8	807,72	1151,60	70,14
9	882,40	1237,07	71,33

Deneysel çalışmadan ve FEM destekli sanal simülasyon çalışmalarında elde edilen itme kuvveti verilerinin karşılaştırılması Şekil 3.'te verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde deneysel çalışma sonuçları ve FEM destekli sanal simülasyon sonuçlarının benzer bir dağılım gösterdiği görülmektedir. -10° yarık talaş açısı ile yapılan deneylerden elde edilen itme kuvveti sonuçlarının diğer yarık talaş açılarında göre daha yüksek sonuçlar verdiği görülmektedir.



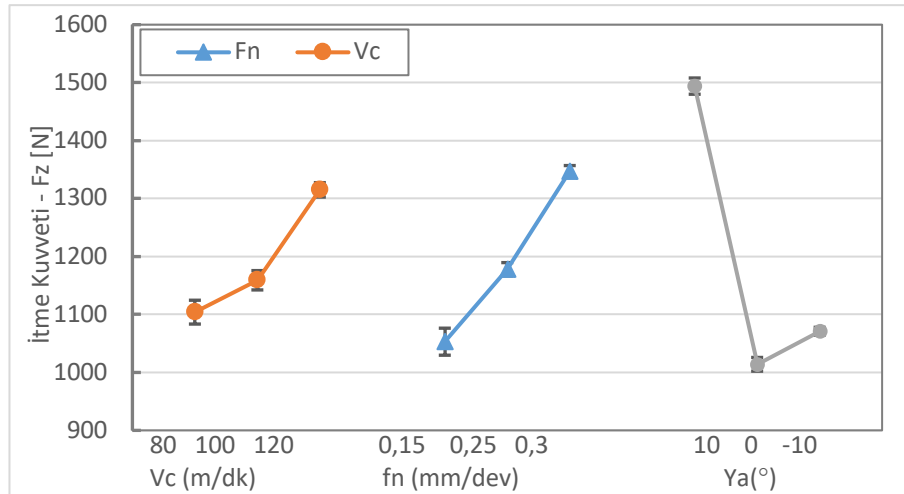
Şekil 3. Deneysel ve FEM destekli sanal simülasyon itme kuvvetleri kıyaslaması (Experimental and FEM-supported virtual simulation thrust comparison)

Taguchi L9 ortogonal dizinine göre yapılan deneysel çalışmadan elde edilen veriler istatistiksel olarak ANOVA ile incelenmiştir (Tablo 7). Yapılan ANOVA analizinden elde edilen sonuçlar %5 (0,05) güven aralığına göre değerlendirilmiştir. Elde edilen P değerlerinin tümünün %5'lik güven aralığından büyük olduğu görülmüştür. Fakat etki oranlarına bakıldığında hatanın etkisinin diğer parametrelerden daha küçük olduğu görülmüştür. Burada yarık talaş açısının etkisinin %63,78, ilerleme miktarının etkisinin %20,32, kesme hızının etkisinin %11,18 ve hatanın etkisinin %4,72 olduğu görülmektedir.

Tablo 7. İtme kuvveti sonuçlarının ortalamaları için Varyans Analiz sonuçları (Analysis of Variance results for the averages of the thrust force results)

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Etki
Vc	2	72329	36164	2,37	0,297	11,18
fn	2	131360	65680	4,3	0,189	20,32
Ya	2	412536	206268	13,5	0,069	63,78
Hata	2	30553	15276			4,72
Toplam	8	646777				100

İtme kuvveti için ANOVA sonuçlarından elde edilen etki grafiği (Şekil 4.) "En küçük değer daha iyidir." yaklaşımıyla incelendiğinde itme kuvveti için optimum sonuçların 80 m/dk kesme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme miktarı ve 0° yarık talaş açısı olduğu görülmektedir. ANOVA sonuçlarında her ne kadar parametrelerin etkisinin olmadığı görülse de etki grafiği incelendiğinde optimum sonuçların diğer parametrelere göre bir etkisinin olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Deneysel çalışma için itme kuvveti etki grafiği (Effect plot of thrust force for experimental study)

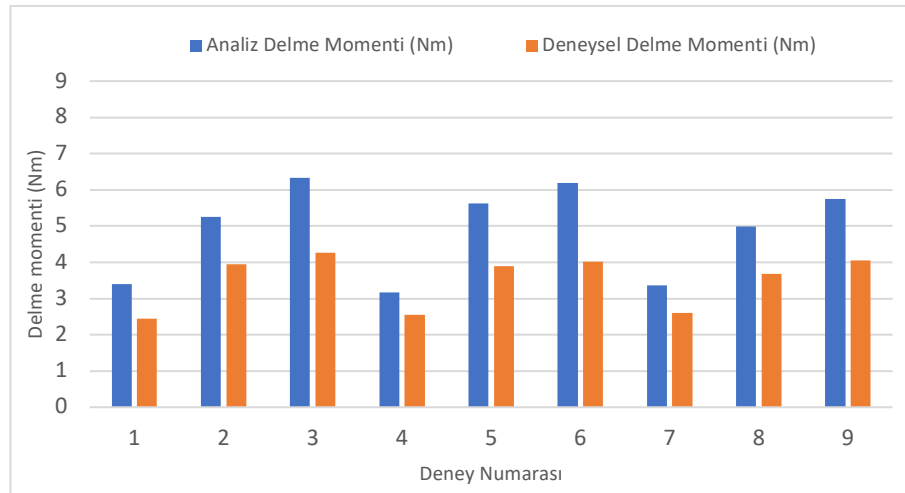
AISI 4140 ıslah çeliğinin deneysel olarak delinmesinden ve FEM destekli sanal simülasyon çalışmalarından elde edilen delme momenti sonuçları Tablo 8'de verilmiştir. Burada FEM destekli sanal simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçlar deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında %90 ile L8 numaralı deneyin en yüksek doğruluk oranını verdiği görülmektedir. En düşük sonucun %68,47 ile L3 numaralı deneyden elde edilmiştir. Yapılan FEM destekli sanal simülasyon çalışması delme momenti tahmini için en düşük %68,47 sonuç vereceği görülmektedir. İlerleme kuvvetinin artmasıyla delme momentinin arttığı literatürde yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [1,9,25].

Tablo 8. Delme momenti için deneysel ve FEM destekli sanal simülasyon çalışma sonuçları (Experimental and FEM supported virtual simulation study results for drilling torque)

Deney No	Analiz Mz Delme Momenti (Nm)	Deneysel Mz Delme Momenti (Nm)	(%) Yaklaşım oranı
1	3,40	2,57	132,25
2	5,25	4,42	118,74
3	6,32	4,33	146,04
4	3,17	2,25	140,89
5	5,63	4,21	133,61
6	6,19	4,29	144,19
7	3,34	4,35	76,78
8	4,99	4,52	110,51
9	5,75	4,25	135,35

3.2. Delme Momentinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Drilling Moment)

Delme momenti için oluşturulan kıyaslama grafiği (Şekil 5.) incelendiğinde itme kuvveti sonuçlarında olduğu gibi benzer bir artış ve azalış gösterdiği görülmektedir. FEM destekli sanal simülasyon sonuçlarının deneysel çalışmadan daha yüksek çıkmaktadır. Delme momenti için 0,3 mm/dev ilerleme miktarı ile yapılan deneylerden daha yüksek bir sonuç elde edilmiştir.



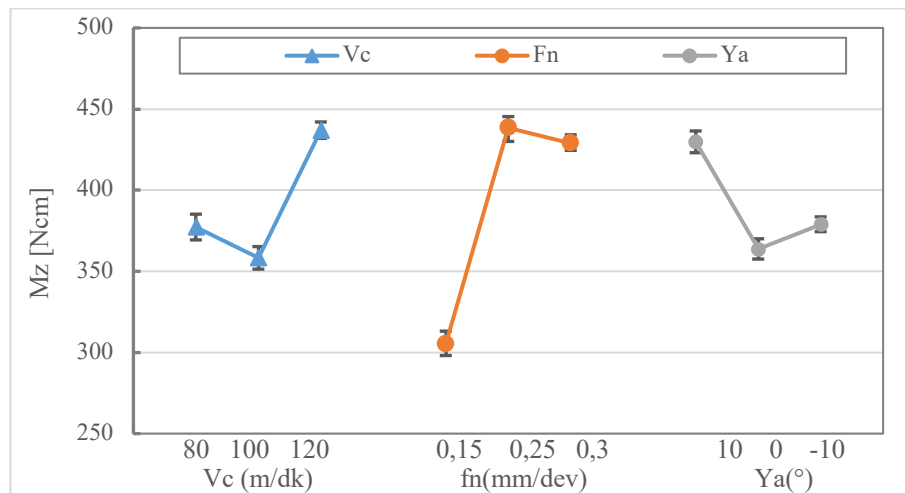
Şekil 5. Deneysel ve FEM destekli sanal simülasyon delme moment sonuçlarının kıyaslanması (Comparison of experimental and FEM supported virtual simulation drilling torque results)

Deneysel çalışmadan elde edilen delme moment sonuçlarına göre Varyans analiz sonuçları Tablo 9.'da verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde elde edilen P değerlerinin %5 (0,05) güven aralığından büyük olduğu görülmektedir. Fakat etki yüzdelere bakıldığında ilerleme miktarının %55,94, kesme hızının %17,07, yarık talaş açısının %12,09 ve hatanın %14,90 etkisinin olduğu görülmüştür.

Tablo 9. Delme moment sonuçlarının ortalamaları için Varyans Analiz sonuçları (Analysis of Variance results for averages of drilling torque results)

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Etki
Vc	2	10122	5061	1,15	0,466	17,07
fn	2	33169	16585	3,75	0,21	55,94
Ya	2	7161	3581	0,81	0,552	12,09
Hata	2	8837	4418			14,90
Toplam	8	59289				100

Delme moment için Varyans analizi sonuçlarından elde edilen etki grafiği Şekil 6.'da verilmiştir. Etki grafiği "En küçük en iyidir." yaklaşımıyla incelendiğinde AISI 4140 ıslah çeliğinin de en etkili kesme parametrelerinin 100 m/dk kesme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme miktarı ve 0° yarık talaş açısının olduğu görülmektedir. Kesme hızı açısından bakıldığında 100m/dk ile 80 m/dk arasındaki fark az iken bu iki parametrenin 120 m/dk'ye göre önemli bir etkisi vardır. İlerleme açısından 0,15 mm/dev ilerleme miktarı diğer iki parametreye göre daha etkilidir. Yarık talaş açısından ise 0° en etkili iken -10° ile arasında önemli bir fark yokken 10° ile aralarında önemli bir fark olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Deneysel çalışma için delme moment etki grafiği (Effect plot of drilling torque for experimental study)

Deneysel çalışmadan elde edilen giriş bölgesi ve çıkış bölgesi ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 10.'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar Varyans analizi ile değerlendirilmiştir. Giriş bölgesi

ortalama yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde ilerleme miktarının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmektedir. Fakat çıkış bölgesi değerlerinde yarık talaş açısının da etkisi görülmektedir. -10° yarık talaş açısı ile yapılan deneylerden elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin diğer iki yarık talaş açısı ile yapılan deneylerden fazla olduğu görülmektedir.

3.3. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi (Evaluation of Average Surface Roughness)

Giriş bölgesi ortalama yüzey pürüzlülük değerleri için yapılan Varyans analizinin sonuçları Tablo 11’de verilmiştir. Elde edilen P değerleri %5 (0,05) güven aralığından yüksek oldukları görülmektedir. Etki oranları hesaplandığında kesme hızının %9,36, ilerleme miktarının %62,75, yarık talaş açısının %8,04 ve hatanın %19,85’lik orana sahiptir. Hatanın yüksek çıkması deneysel çalışmanın Taguchi L9 ortogonal dizinine göre yapılmasıdır. Varyans analizi sırasında ara değerlerin olmaması kesme parametrelerinin birbirleriyle olan etkilerinin incelenmesine olanak vermemektedir. Bu yüzden hata oranı yüksek çıkmaktadır.

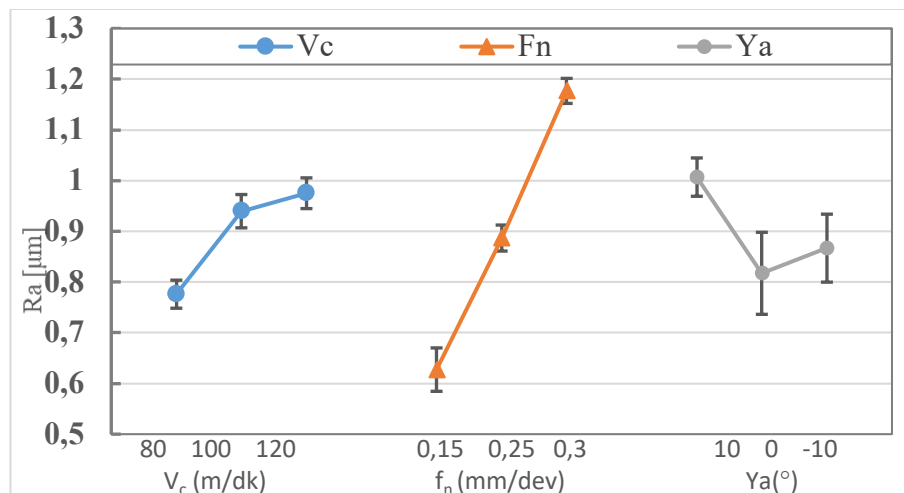
Tablo 10. Ortalama yüzey pürüzlülük sonuçları (Average surface roughness results)

Deney No	Vc(m/dk)	Fn (mm/dev)	Ya($^\circ$)	Giriş (μm)	Çıkış (μm)
1	80	0,15	+10	0,346	0,374
2	80	0,25	0	0,857	0,929
3	80	0,3	-10	1,126	1,232
4	100	0,15	0	0,550	0,473
5	100	0,25	-10	0,909	1,047
6	100	0,3	+10	1,360	1,583
7	120	0,15	-10	0,986	1,572
8	120	0,25	+10	0,894	1,375
9	120	0,3	0	1,045	1,258

Tablo 11. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (giriş bölgesi) sonuçlarının Varyans Analizi (Variance analysis results of mean surface roughness (entry zone))

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Etki
Vc	2	0,06768	0,03384	0,47	0,68	9,36
fn	2	0,45364	0,22682	3,16	0,24	62,75
Ya	2	0,05805	0,02903	0,4	0,712	8,04
Hata	2	0,14352	0,07176			19,85
Toplam	8	0,72289				100

Giriş bölgesi ortalama yüzey pürüzlülüğü için elde edilen etki grafiği (Şekil 7) incelendiğinde 80 m/dk kesme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme miktarı ve 0° matkap yarık talaş açısının “en küçük en iyi” yaklaşımına göre en etkili parametreler olduğu görülmektedir. Kesme hızı için bakıldığında 80 m/dk’nın diğer iki kesme hızına göre daha etkili olmakla beraber 100 m/dk ve 120 m/dk kesme hızları arasında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. İlerleme miktarı açısından ise her üç ilerleme miktarının arasında önemli bir fark olduğu görülmektedir. Yarık talaş açısı bakımından ise 0° ve -10° derece arasında önemli bir farkın olması fakat bu iki değer + 10° ’den daha etkili olduğu söylenebilir.



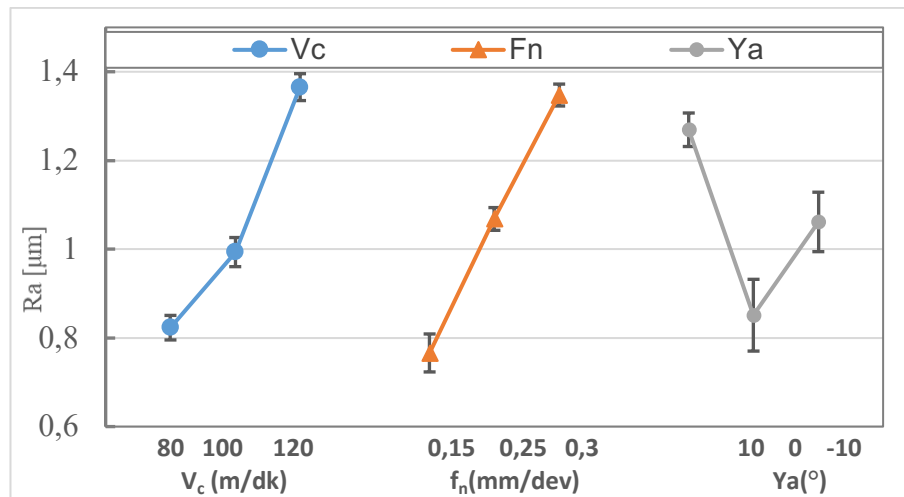
Şekil 7. Giriş bölgesi ortalama yüzey pürüzlülüğü etki grafiği (Entry zone average surface roughness effect plot)

Çıkış bölgesi ortalama yüzey pürüzlülüğü Varyans analiz sonuçları Tablo 12’de verilmiştir. Elde edilen P değerlerinin %5 güven aralığından yüksek çıktığı görülmektedir. Etki oranları incelendiğinde ilerleme miktarının %33,5, kesme hızının %30,46, yarık talaş açısının %17,31 ve hatanın %18,73 etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 12. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (çıkış bölgesi) sonuçlarının Varyans Analizi (Variance analysis results of mean surface roughness (exit zone))

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Etki
Vc	2	0,4614	0,2307	1,63	0,381	30,46
Fn	2	0,5075	0,2538	1,79	0,359	33,50
Ya	2	0,2623	0,1312	0,92	0,52	17,31
Hata	2	0,2838	0,1419			18,73
Toplam	8	1,515				100

Şekil 8’de çıkış bölgesi için verilen etki grafiği “En küçük en iyidir.” Yaklaşımıyla incelendiğinde 80 m/dk kesme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme miktarı ve 0° yarık talaş açısının çıkış bölgesi ortalama yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrelerin olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Çıkış bölgesi ortalama yüzey pürüzlülüğü etki grafiği (Exit zone average surface roughness effect plot)

4.Sonuçlar (Conclusions)

Taguchi L9 ortogonal dizinine göre oluşturulan deney tasarımı doğrultusunda yapılan deneysel çalışmada matkap yarık talaş açısının itme kuvveti, delme momenti, giriş ve çıkış bölgesi ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Elde edilen verilerin Varyans analizi ile değerlendirilmesinde itme kuvveti için en etkili parametrenin yarık talaş açısı, delme momenti, giriş ve çıkış bölgesi ortalama yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin ilerleme miktarının olduğu görülmektedir. Varyans analizinden elde edilen etki grafikleri “en küçük en iyidir” yaklaşımıyla değerlendirildiğinde en uygun kesme parametreleri:

- İtme kuvveti için 80 m/dk keme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme miktarı ile 0° yarık talaş açısı,
- Delme momenti için 100 m/dk kesme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme miktarı ile 0° yarık talaş açısı,
- Giriş bölgesi ortalama yüzey pürüzlülüğü için 80 m/dk keme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme miktarı ile 0° yarık talaş açısı,
- Giriş bölgesi ortalama yüzey pürüzlülüğü için 80 m/dk keme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme miktarı ile 0° yarık talaş açısı en düşük değerleri veren parametreler çıkmaktadır.

Yapılan FEM destekli sanal simülasyon çalışmaları da farklı yarık talaş açılarıyla yapılan delme çalışmalarında:

- İtme kuvveti için teorik çalışmaya göre en yakın %98,36 ile 1 numaralı deneyin sanal simülasyon çalışması, %67,52 ile 7 numaralı deneyin sanal simülasyon çalışması en uzak oranda sonuç vermiştir.
- Delme momenti için ise teorik çalışmaya göre %110,51 ile 8 numaralı deneyin sanal simülasyon

çalışması, %146,04 ile ise 3 numaralı deneyin sanal simülasyon çalışmasının en uzak oranda sonuç vermiştir.

Yapılan sanal simülasyon çalışmalarının % yaklaşım oranlarına bakıldığında farklı yarık talaş açısına sahip matkaplar ile yapılacak sanal simülasyon çalışmalarının deneysel çalışma öncesi yol gösteri sonuçlar vermektedir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışma "TÜBİTAK 1002- Hızlı Destek Programı" kapsamında "221M191" numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarları TÜBİTAK'a teşekkür eder. Ayrıca bu çalışmada kullanılan takımların tasarım ve temininde destek sağlayan Karcan Kesici Takım San. ve Tic. A.Ş'ye teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] Ş. Bayraktar, Y. Siyambaş, and Y. Turgut, "Delik delme prosesi: Bir Araştırma," *Sakarya University Journal of Science*, vol. 21, no.2, pp. 120-130, April 2017. doi:10.16984/saufenbilder.296833
- [2] H. Gökçe, "Investigation of Drilling Performance of CuZn15 Brass Material," *European Journal of Science and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 32-42, Jan 2021. doi:10.31590/ejosat.849503
- [3] M. E. Merchant, "Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip," *Journal of applied physics*, 16.5, pp. 267-275, Sept 1945. doi:10.1063/1.1707586
- [4] Z. Demir, and R. Yakut, "An investigation of the effect of parameters and chip slenderness ratio on drilling process quality of AISI 1050 steel," *Advances in Materials Science and Engineering*, May 2018. doi:10.1155/2018/9753464.
- [5] P. Feng, J. Wang, J., Zhang, and J. Zheng, "Drilling induced tearing defects in rotary ultrasonic machining of C/SiC composites," *Ceramics International*, vol. 43, no. 1, pp. 791-799, January 2017. doi:10.1016/j.ceramint.2016.10.010
- [6] J. Wang, P. Feng, J. Zheng, and J. Zhang, "Improving hole exit quality in rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites using a compound step-taper drill," *Ceramics International*, vol. 42, no. 12, pp. 13387-13394, September 2016. doi:10.1016/j.ceramint.2016.05.095
- [7] H. Gökçe, M. Yavuz, H. Gökçe, and U. Şeker, "Orjinal Matkap Geometrisinde Delme Performansının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Doğrulanması," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 3, no. 1, pp. 27-34, April 2017.
- [8] M. C. Çakır, *Modern Talaşlı İmalatın Esasları*. Vipaş AŞ, Bursa. 1999.
- [9] D. M. Rincon, A. G. Ulusoy, and B. Kaftanoğlu, "Effects of drill vibrations on cutting forces and torque," *CIRP annals*, vol. 43, no. 1, pp. 59-62, 1994. doi:10.1016/S0007-8506(07)62164-7
- [10] W. C., Chen, K. H., Fuh, C. F., Wu, and B. R. Chang, "Design optimization of a split-point drill by force analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 58, no. 2-3, pp.314-322, March 1996. doi:10.1016/0924-0136(95)02156-6
- [11] Y. Çavuş, Ş. Katmer, İ. Tekaüt, S. Kurt, and U. Şeker, "Delme işlemlerinde matkap yarık talaş açısının itme kuvveti ve delme momenti üzerindeki etkisi," *9th International Congress On Machining, Kasım 2018, Antalya*, pp.341-347.
- [12] G. Meral, M. Sarıkaya, M., Mia, H. Dilipak, U. Şeker, and M. K. Gupta, "Multi-objective optimization of surface roughness, thrust force, and torque produced by novel drill geometries using Taguchi-based GRA," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, no. 5, pp. 1595-1610, November 2018. doi:10.1007/s00170-018-3061-z
- [13] M. Arafat, "CNC delme işleminde delme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü açısından optimizasyonu," Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2009.
- [14] M. E. Korkmaz, R. Çakıroğlu, N. Yaşar, R. Özmen, and M. Günay, "Al2014 Alüminyum Alaşımının Delinmesinde İtme Kuvvetinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi," *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol. 6, no. 1, pp.193-199, January 2019. doi:10.31202/ecjse.449701
- [15] G. Meral, M. Sarıkaya, M. Mia, H. Dilipak, and U. Şeker, "Optimization of hole quality produced by novel drill geometries using the Taguchi S/N approach," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, no. 1, pp. 339-355, November 2018. doi:10.1007/s00170-018-2956-z
- [16] N. Tosun, C. Özek, G. Tosun, G. "Delme İşleminde Yüzey Pürüzlülüğünün Deneysel İncelenmesi," *11.Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, pp. 867-874, 2004.

- [17] G. V. Tofana, M. S. Popa, and S. Sattel, "Solid carbide tool wear monitoring and evaluation in drilling processes," *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 113-120, June 2013.
- [18] M. Yavuz, H. Gökçe, İ. Çiftçi, H. Gökçe, Ç. Yavaş, and Şeker, U. "Investigation of the effects of drill geometry on drilling performance and hole quality." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 9, pp. 4623-4633, January 2020. doi:10.1007/s00170-019-04843-3
- [19] A. N. Siddiquee, Z. A. Khan, P. Goel, M. Kumar, G. Agarwal, and N. Z. Khan, "Optimization of deep drilling process parameters of AISI 321 steel using Taguchi method," *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 1217-1225, 2014. doi:10.1016/j.mspro.2014.07.195
- [20] İ. Tekaut, H. Demir, and U. Şeker, "Experimental analysis and theoretical modelling of cutting parameters in the drilling of AISI H13 steel with coated and uncoated drills," *Transactions of FAMENA*, vol. 42, no. 2, pp. 83-96, 2018. doi:10.21278/TOF.42207
- [21] M. L. Polli, and M. J. Cardoso, "Effects of process parameters and drill point geometry in deep drilling of SAE 4144M under MQL," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, no.3, pp. 1-9, February 2018. doi:10.1007/s40430-018-1062-3
- [22] F. Jafarian, and H. Samarikhalaj, "Experimental investigation and optimizing geometrical characteristics and surface quality in drilling of AISI H13 steel," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 6, no. 2, pp.332-343, 2020. doi:10.22055/JACM.2019.29070.1552
- [23] V. P. Astakhov, "Effects of the cutting feed, depth of cut, and workpiece (bore) diameter on the tool wear rate," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 34, no. 7, pp. 631-640, May 2007. doi:10.1007/s00170-006-0635-y
- [24] B. K., Lambert, "Prediction of force, torque and burr length in drilling titanium-composite materials," *Society of Manufacturing Engineer*, 1979.
- [25] M. Yavuz, H. Gökçe, Ç. Yavaş, İ. Korkut, and U. Şeker, "Matkap geometrisinin delik kalitesi ve kesme performansına etkisi," *Sakarya University Journal of Science*, vol. 21, no. 5, pp. 1051-1066, 2017. doi:10.16984/saufenbilder.292019

This is an open access article under the CC-BY license

