

**YAYINCI**  
PUBLISHER



# MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ

**JOURNAL OF ENGINEERING  
SCIENCES AND DESIGN**

**e-ISSN: 1308-6693**

**Cilt/Volume: 8 Sayı/Issue: 2 Haziran/June 2020**



Gultekin OZDEMIR, *Suleyman Demirel University, TR (Baş Editör / Editör-in-Chief)*

Erdal AYDEMİR, *Suleyman Demirel University, TR*

Turgay AYDOĞAN, *Suleyman Demirel University, TR*

Mehmet AVCAR, *Suleyman Demirel University, TR*

Ali AGCAL, *Suleyman Demirel University, TR*

Çağlayan BALKAYA, *Suleyman Demirel University, TR*

Atilla BAYRAM, *Van Yuzuncu Yıl University, TR*

Mehmet Ali BELEN, *Artvin Coruh University, TR*

Habib GURBUZ, *Suleyman Demirel University, TR*

Baris GUREL, *Suleyman Demirel University, TR*

U. Yalcin KALYONCUOĞLU, *Istanbul Medeniyet University, TR*

Ecir Ugur KUCUKSILLE, *Suleyman Demirel University, TR*

Alper KUSCU, *Suleyman Demirel University, TR*

Mehmet Onur OLGUN, *Suleyman Demirel University, TR*

Mehmet OZCELIK, *Suleyman Demirel University, TR*

Savas OZUN, *Suleyman Demirel University, TR*

Yunus PAMUKOĞLU, *Suleyman Demirel University, TR*

Olçay POLAT, *Pamukkale University, TR*

Hakan TONGAL, *Suleyman Demirel University, TR*

Volkan UZ, *Izmir Institute Of Technology, TR*

Sibel YIGITASLAN, *Suleyman Demirel University, TR*

Demet YILMAZ, *Suleyman Demirel University, TR*

Michael G. KAY, *North Carolina State University, USA*

Yun-Chia LIANG, *Yuan Ze University, TW*

Ravi SANKAR, *University of South Florida, USA*

Alice E. SMITH, *Auburn University, USA*

Bedri TUC, *Baskent University, TR*

Erol TUTUMLUER, *University of Illinois at Urbana-Champaign, USA*

Fatma YALCINKAYA, *Technical University of Liberec, Czech Republic*

Gerhard-Wilhelm WEBER, *Middle East Technical University, TR*

Turgay AYDOĞAN, *Suleyman Demirel University, TR*

Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi editörlüğünde ve ULAKDİM DERGİPARK ev sahipliğinde yayımlanan Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi (MBTD) yayın hayatına 2010 yılında başlamıştır. Mart, Haziran, Eylül ve Aralık Nisan, Ağustos ve Aralık aylarında olmak üzere yılda 4 sayı şeklinde yayım yapan uluslararası hakemli bir dergidir.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi (MBTD), TÜBİTAK-ULAKBİM-DERGİPARK sistemine kabul edilmiştir. Dergi, TÜBİTAK-ULAKBİM Mühendislik ve Doğa Bilimleri Veri Tabanı (TR-DİZİN), Google Scholar ve alan indeksi olarak EBSCOHOST tarafından indekslenmektedir.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi (MBTD) yayın dili Türkçe ve İngilizce olan araştırma makalesi, derleme ve çeviri türünden metinleri, yazım kurallarına uygun hazırlanmış olması koşuluyla internet üzerinden değerlendirmeye kabul eder. Değerlendirilmek üzere dergimize gönderilen metinlerin, daha önce yayınlanmamış, yayınlamak üzere kabul edilmemiş ve yayınlanmak için değerlendirme sürecinde olmaması gerekir. Değerlendirme sürecinde olan ve yayınlanan eserlerin sorumluluğu tamamen yazarlara aittir. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi (MBTD) internet üzerinden e-dergi şeklinde yayınlanır ve değerlendirme süreci elektronik ortamda çift-körleme yöntemiyle takip edilir. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi (MBTD)'nde yayınlanan tüm eserlerin yayın hakkı Süleyman Demirel Üniversitesi'ne aittir.

Journal of Engineering Sciences and Design (JESD) supported by Suleyman Demirel University Engineering Faculty, and hosted by ULAKBİM DERGİPARK, a national refereed journal, has been in publication since 2010 The journal will be published four times in a year as March, June, September, and December.

Journal of Engineering Sciences and Design (JESD) has been accepted for TUBITAK ULAKBİM DERGİPARK system in order to provide on-line journal management. JESD is now indexing by TUBITAK-ULAKBİM Engineering and Natural Sciences, Google Scholar, and EBSCOHOST.

Although the language of the journal is Turkish, manuscripts prepared in English is also welcome. JESD accepts and publishes on on-line open journal system manuscripts prepared as research paper, literature reviews, and translated articles as long as they are in accordance with the journal's writing guidelines. Manuscripts, which have been published previously, accepted for publication, or currently being considered for publication elsewhere, will not be considered for publication. The authors are solely responsible for the ideas and opinions expressed in the articles, of which Suleyman Demirel University cannot be held responsible. The Journal of Engineering Sciences and Design (JESD), is electronically managed, double-blinded journal from the submission of manuscripts to the publication. Suleyman Demirel University holds the copyright of all published material that appear in JESD.

İçindekiler / Contents

Araştırma Makalesi / Research Articles

<a href="#">FEATURE ANALYSIS FOR MULTI-CRITERIA RATING VALUES OF AIRLINE COMPANIES</a>	333-344
Tuğba KAYA, Zehra Kamışlı ÖZTÜRK	
<a href="#">BİYOKYİT TEDARİK ZİNCİRİ AĞ TASARIMI ÇALIŞMALARINI İÇİN ÖZ DÜZENLEYİCİ HARİTALAR</a>	345-356
Fatih ÖZTÜRK, Ali Osman KUŞAKCI, Berk AYVAZ, Melike SİRACAYA KARAKOÇ	
<a href="#">A NEW IMPERCEPTIBLE STEGANOGRAPHY METHOD FOR GRAYSCALE IMAGES</a>	357-365
Hüseyin Bilal MACİT, Arif KOYUN	
<a href="#">SENTIMENT ANALYSIS FROM SOCIAL MEDIA COMMENTS</a>	366-374
Özer ÇELİK, Usame Ömer OSMANOĞLU, Büşra ÇANAĞCI	
<a href="#">BULANIK AKSİYOMATİK TASARIM VE HEDEF PROGRAMLAMA YAKLAŞIMLARIYLA BİR ÜRÜN TASARIMI</a>	375-387
Muhammed KIR, Özer UYGUN, Sena KIR	
<a href="#">YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ELEKTROSTATİK LENS SİSTEM TASARIMI</a>	388-396
Nimet IŞIK, Ali Hakan ISIK	
<a href="#">ESTIMATION OF THE FRICTION PARAMETERS OF LINEAR PNEUMATIC CYLINDERS</a>	397-406
Mustafa DAĞDELEN, Mehmet İltiş SARIĞEÇİLİ	
<a href="#">TÜRKİYE'DEKİ GÜNCEL BİYOKÜTLE POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ VE YAKILMASIYLA ENERJİ ÜRETİMİ İYİ BİR ALTERNATİF OLAN BİYOKÜTLE ATIKLAR İÇİN SEKTÖREL AÇIDAN VE TOPLAM YANMA ENERJİ DEĞERLERİNİN HESAPLANMASI</a>	407-416
Bariş GÜREL	
<a href="#">KISMİ YAYILI YÜK ETKİSİNDEKİ NANO KİRİŞLERİN DİNAMİK ANALİZİ</a>	417-428
Mustafa ARDA	
<a href="#">INVESTIGATION OF FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS PRODUCED WITH SELF COMPACTING AND NORMAL CONCRETE</a>	429-438
Salih CENGİZ, Mehmet KAMANLI, Alptuğ ÜNAL	
<a href="#">AFYON-SANDIKLI JEOTERMAL ALANINDA DÜŞEY ELEKTRİK SONDAJ (DES) ARAŞTIRMASI VE KUYULARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ</a>	439-450
M.Nuri DOLMAZ, Bilal ŞAHİN, Hatice Evrim TÜTÜNSATAR, Çağlayan BALKAYA	
<a href="#">KARAYOLLARINDA ÜSTYAPI TİPİNİN KARBON AYAK İZİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI</a>	451-459
Emre ALTINÖZ, Serdal TERZİ	
<a href="#">AĞSAP MALZEMELERİN İSLANABİLİRLİK ÖZELLİĞİ ÜZERİNE ISIL İŞLEM UYGULAMASININ ETKİSİ</a>	460-466
Şemsettin KILINÇARSLAN, Yasemin ŞİMŞEK	
<a href="#">ZAMAN VE FREKANS DÜZLEMİNDE YORULMA ÖMRÜ HESAPLAMA YÖNTEMLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ</a>	467-478
Ömer Faruk DEMİRKAYA, Kenan TÜFEKÇİ	
<a href="#">ÇİMENTOLU MACUN DOLGUDA C SINIFI UÇUCU KÜLÜN ÇİMENTO YERİNE İKAMESİNİN DAYANIMA OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ</a>	479-488
Serkan TÜYLÜ	
<a href="#">KOCAELİ / BAŞİSKELE İLÇESİ AFET VE ACİL DURUM TOPLANMA ALANLARININ YETERLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ</a>	489-500
Serpil GERDAN, Alper ŞEN	
<a href="#">ÇELİK TAHİL DEPOLAMA SİLOLARININ SİSMİK ANALİZİ ÜZERİNE GENEL BİR DEĞERLENDİRME VE YENİ ANALİZ YAKLAŞIMLARI</a>	501-520
Ali İhsan ÇELİK, Mehmet Metin KOSE	
<a href="#">VAN GÖLÜ KAPALI HAVZASINDA YAĞIŞLARIN TREND ANALİZİ</a>	521-532
Sevda COŞKUN	
<a href="#">EMPEDANS FAKTÖRÜ KULLANILARAK KONSOLIDASYON DENEYİNDE KULLANILAN GÖZENEKLİ TAŞLARIN GEÇİRİMLİLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ</a>	533-540
Mustafa ÖZER, Nurcan BAKDI	

<i>ISM 2.45 GHz MİKROŞERİT İMPLANT ANTEN TASARIMI VE DOKU İÇİ ÖLÇÜMLERİ</i>	541-551
<i>Fatih ALPER, Özlem COŞKUN</i>	
<i>PALPLANŞ DUVARLARDA ÇAKMA DERİNLİĞİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ</i>	552-561
<i>Recep AKAN</i>	
<i>KAZMACA-KIRIKKALE EOSEN HAVZASININ JEOLojİK ÖZELLİKLERİ VE KÖMÜR VARLIĞININ ARAŞTIRILMASI</i>	562-571
<i>Murat ŞENTÜRK</i>	
<i>YERE NÜFUZ EDEN RADAR YÖNTEMİ İLE BALAST KİRLİLİĞİNİN BELİRLENMESİ</i>	572-581
<i>Mehmet Çağrı BAYRAK, Mesut TİGDEMİR, Mustafa KARAŞAHİN, Olcay ÇAKMAK</i>	
<i>BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORDA EGZOZ ATIK ISI GERİ KAZANIMI İÇİN TERMoeLEKTRİK JENERATÖR MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ</i>	582-596
<i>Ümit TOPALCI, Habib GÜRBÜZ, Hüsameddin AKÇAY, Selim DEMİRTÜRK</i>	
<i>ENVIRONMENTAL IMPACT AND COST ASSESSMENT OF COMMERCIAL FLIGHT INDUCED EXHAUST EMISSIONS AT ISPARTA SÜLEYMAN DEMİREL AIRPORT</i>	597-604
<i>Selcuk EKİCİ, Yasin ŞÖHRET</i>	
<i>FOSFORİK ASİDİN REJENERE SELÜLOZ ESASLI LİFLER ÜZERİNE ETKİSİ</i>	605-611
<i>Kemal Şahin TUNÇEL</i>	
<i>KAPALI ALAN KONUMLANDIRMA SİSTEMLERİ İÇİN DÜĞÜM PROTOTİPİ GELİŞTİRME</i>	612-624
<i>İsmail KIRBAŞ, Kadir ARSLAN</i>	
<i>INFLUENCE OF RARE EARTH SUBSTITUTION ON THE MAGNETIC PROPERTIES OF SPINEL FERRITES</i>	625-634
<i>Ayşe DEMİR KORKMAZ</i>	
<b>Derleme Makaleler / Review Articles</b>	
<i>YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARI, AVRUPA BİRLİĞİ DEMİRYOLU POLİTİKALARI VE BU BAĞLAMDA TÜRKİYE'DEKİ GELİŞMELERİN İNCELENMESİ</i>	635-642
<i>Mehmet Fatih ALTAN, Mehmet Çağrı KIZILTAŞ</i>	
<i>THE BASIC CONCEPTS OF MICRO-MILLING PROCESS AND ITS REVIEW IN TERMS OF DISTINCTIVE PARAMETERS</i>	643-654
<i>Luqman Khaleel Haydery ALATRUSHI, Fevzi BEDİR, Nihat YILMAZ</i>	



## FEATURE ANALYSIS FOR MULTI-CRITERIA RATING VALUES OF AIRLINE COMPANIES

Tugba KAYA<sup>1\*</sup>, Zehra Kamisli OZTURK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eskisehir Technical University, Faculty of Engineering, Dept. of Computer Engineering, Eskisehir, Turkey

<sup>2</sup> Eskisehir Technical University, Faculty of Engineering, Dept. of Industrial Engineering, Eskisehir, Turkey

### Keywords

*Multi Criteria Decision Making, Artificial Neural Network, Multi-layer Perceptron, Promethee II, Airline Companies.*

### Abstract

The development of information and communication technologies offers the possibility of collecting and sharing customer views, comments and ratings about products and services over the Internet. Customers generally make these evaluations based on multiple criteria. This study uses such data recorded on Skytrax to analyse the performance of leading airlines. It does so using the a multicriteria decision making technique (Promethee II), and the criteria weight values required for the Promethee II method are obtained from a Multi-Layer Perceptron (MLP), an artificial neural network method. According to the results obtained, ANA airline has shown improvements in the years and moved up to the top, while the ranking of United airline within two years has not changed. The paper provides details of the technique and graphically presents results to highlight where airlines possess advantages over their competitors.

## HAVAYOLU FİRMALARININ ÇOK KRİTERLİ OY DEĞERLERİ İÇİN NİTELİK ANALİZİ

### Anahtar Kelimeler

*Çok Kriterli Karar Verme, Yapay Sinir Ağları, Çok Katmanlı Algılayıcı, Promethee II, Havayolu Firmaları.*

### Öz

Bilgi ve iletişim teknolojilerinin gelişmesi, internette yer alan servisler ve ürünler hakkında müşterinin bakış açısı, yorumları ve oy değerlerinin paylaşılmasına ve toplanmasına imkân sağlamıştır. Müşteriler, bu değerlendirmeleri çoklu kriterlere dayanarak gerçekleştirmektedir. Bu çalışmada, havayolu firmalarının performans analizi için Skytrax' da yer alan veriler kullanılmıştır. Çok kriterli karar verme teknikleri kullanılarak yapılan bu çalışmada, Promethee II için gerekli olan ağırlık değerleri, bir yapay sinir ağları modeli olan Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda ANA havayolu firmasının yıllar içerisinde gelişmeler gösterip üst sıralara taşınırken, United havayolu firmasının iki yıl içerisindeki sıralamasında herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu makalede kullanılan tekniklerin detayları verilirken, elde edilen sonuçlarda havayolu firmaları için rekabette sağladığı avantajlar vurgulanmıştır.

### Alıntı / Cite

Kaya, T., Kamisli Ozturk, Z., (2020). Feature Analysis For Multi-Criteria Rating Values of Airline Companies, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(2), 333-344.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

T. Kaya, 0000-0003-2202-7282  
Z. Kamisli Ozturk, 0000-0003-3156-6464

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	12.09.2018
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	20.12.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	20.12.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

## 1. Introduction

Efficiency in the service sectors is getting much more significant issue in global trade. The one of the most important services in global service sector is airline companies. This service grows continuously year by year. A competition between airline companies has begun because of this growth. Therefore, it is aimed to be customer and customer satisfaction with focus to get in this top ranking of the competition. Customers will also make a

\* İlgili yazar / Corresponding author: tugbatirkoglu@eskisehir.edu.tr, +90-222-321-3550

decision and select the most appropriate one from among many airline companies. The decision making is the process of finding the best option from all of the feasible alternatives. During the decision making process, the decision maker tries to determine the most appropriate alternative from the limited number of alternatives. But there must be a need to reliable and correct data at the decision-making process.

With the development of technology, there is an increase in the importance of knowledge. Although there exists a lot of data on the Internet, it has significance when these data are useful information. People's decision-making mechanism that use it to accomplish their goals is affected from the data stack. But there must be useful information in data for their decisions. However, this decision may be based on just a single criterion or multi criteria. In addition, whenever the number of criteria increases, the contradictions between them make the decision process more complex. For example, when a customer wants to buy a car, he will look at the fuel consumption and also price, model, color, popularity of this car. Based on this fact, decision makers prefer to use systematic decision making ways like multi criteria decision making (MCDM) techniques. The MCDM has emerged in the 1960s with the need for a number of tools to help decision making process. The MCDM can provide a probing solution with multiple and consistent criteria and ensure that the right choice is made. As Vassilev et al. (Vassilev et al., 2005) indicated, the multicriteria analysis problems can be divided into three types: problems of multicriteria choice, problems of multicriteria ranking and problems of multicriteria sorting. Many real-life problems in management practice may be formulated as problems of choice, ranking or sorting of resources, strategies, projects, offers, policies, credits, products, innovations, designs, costs, profits, portfolios, etc.

The purpose of this study is to evaluate the decisions of airline companies' passengers. To examine passenger satisfaction, airline companies have always submitted questionnaires on the Internet that are done based on multiple criteria. The passengers are commenting verbally and numerically on these criteria that they are satisfied with or not satisfied with. If the passenger is satisfied with his/her travel, the votes will be a plus for the company. However, if these assessments need to be properly analysed then companies can develop different strategies. These analyses should not be done in terms of a single passenger. Because, the features that make each passenger happy during the traveling can vary. So, if the company tries to develop a strategy by taking into account a single passenger, this tactic will not be applied to other traveling or traveling passengers. For this reason, almost all travelled passengers are considered and their comments are assessed, and different attitudes can be created.

In this study, it is aimed to determine the attitudes of passengers traveling in airline companies and a hybrid MCDM approach is adapted to determine these attitudes. This study consists of four sections. Section 2 contains literature review; information about the methods and algorithms used throughout the study are given in Section 3. Section 4 contains the implementation of the methods, and finally the results are given.

## 2. Related Work

In the competitive industry such as the airline industry, it is important for firms not only to correctly perceive what their customers want and expect, but also to manage their own resources in meeting their customer expectations appropriately. It has been done much work in the literature regarding the determination of user or customer attitudes and behaviours (Vela and Garcia, 2010; Liou and Tzeng, 2010). In this context, using Miranda and Henriques clustering methodology, airline passenger data were analysed and focused on companies seeking to develop different campaign strategies (Miranda and Henriques, 2013). For this work, the performance of k-means, self-organizing maps (SOM) and hierarchical self-extracting algorithms were evaluated. The analyses were carried out on data of 20,000 passengers. When the results are examined, the k-average is the best, as well as similar results with self-regulating maps. Vela and Garcia also performed clustering on passenger evaluations of different flight qualities and characteristics of the trip (Vela and Garcia, 2010). In their study, they concluded that there were four segments of passengers. These segments are price-sensitive, destination and flight-conscious, non-responsive and business travellers, educators and second-tier tourists. Wang et al. tried to discover a more general structure of the similarity (Wang et al., 2002). The researchers tried to create a new model called pCluster. The study team designed a depth-first algorithm that can effectively expose all pCluster models that are larger than the user-specified threshold value. In another study, Strehl et al. observed clustering quality using similarity measures of euclidean, cosine, Pearson and expanded JacCard (Strehl et al., 2000). They concluded that random, self-extractive maps, hyper-graph partitioning, general k-means, weighted graph partitioning algorithms are better than hypergraph partitioning in performance. Jarvis and Patrick focused on the problem of how data would be clustered in a nonparametric way (Jarvis and Patrick, 1973). The shortest search tree presented a method with apparent similarities with the clustering method. Gourdin categorized airline service quality into three items: price, safety and timeliness (Gourdin, 1998). The researchers compared the fuzzy c-means and the possible c-means with the similarity clustering algorithm, which is a combination of the five algorithms. As a result, selected aggregate hierarchical clustering method and similarity-based clustering yield strong clustering results.

Liou and Tzeng reviewed Taiwan airline customers' responses to a simple and multiple-choice questionnaire with rough set-based classification (Liou and Tzeng, 2010). In the end, they found two dominant criteria that affected customers' decision stage; security and wages. Wang et al. compared the operational performance which relationship between four factors: airport, passengers, airline companies and fire services, of ten major airports in Taiwan (Wang et al., 2004). The results indicate that the total performance and the rating of the airports of all classes differ when examined in the context of several efficiency criteria. Feng and Wang tried to construct a performance evaluation process for airlines with financial ratios on five domestic airlines in Taiwan (Feng and Wang, 2000). Their study consists of three parts: production, marketing, execution. Transportation indicators are more suitable to measure the production efficiency than financial ratios and mixed indicators, and the execution efficiency is the best measured by financial ratios.

According to Bongo et al. (Bongo et al., 2017), MCDM approaches are successfully applied for (a) tourism development; (b) selecting aircraft type; (c) assessing productive efficiency in airports; (d) mitigating air traffic flow congestion; and (e) evaluating service quality of airports. In their study, Kurtulmuşoğlu et al. (Kurtulmuşoğlu et al., 2016) gave a brief summary of previous airline service expectation studies between the years 1980-2015. Almost all studies here are about service quality and customer satisfaction for a common airline firm. In addition to these studies, Oz and Koksall (Oz and Koksall, 2016) demonstrated the relative operating efficiencies of the Star Alliance group member airlines using their panel data for the years 2013 and 2014 with Data Envelopment Analysis (DEA) method. They also give a brief review of the studies that used DEA to determine airline industry efficiencies.

Besides these studies Tsaur et al. used the fuzzy set theory to evaluate the service quality of airline with fifteen service criteria (Tsaur et al., 2002). They applied Analytical Hierarchy Process to obtain criteria weights and then ranked the airlines with TOPSIS method. As a result, customers are mainly concerned about physical side of service and courtesy of attendants, safety, comfort and cleanness of seat and responsiveness of attendants are the most important criteria. Barros and Wanke used TOPSIS method. Then, neural networks are combined with TOPSIS results to evaluate Africa airlines. They concluded the results that the first rank is Air Seychelles and the least efficient airline is Egypt Air (Barros and Wanke, 2015). Liou et al. proposed an approach for airline selection. In that study, analytical hierarchy process (AHP) was integrated with a type of preference ordering involving the determination a solution's similarity to an ideal solution (TOPSIS) and multi-segment goal programming (MSGP) (Liou et al., 2011).

Lacic et al. tried to determine which of the ratings and interpretation features are more decisive for passenger satisfaction in their work (Lacic et al., 2016). During the study, researchers examined the data on the Skytrax portal, where airline and airline passenger assessments were shared, and found that waiting time at the airport, comfort in the waiting room, cabin staff for the airline and knee in the seat contributed to overall customer satisfaction.

As seen from the literature review, while determination of user attitudes and behaviours of airline companies have been worked for years, the evaluation of airline companies with hybrid MCDM techniques has not been worked intensively yet. The advantage of this study is the weights of evaluation criteria used in the MCDM method are determined by an artificial neural network model. This hybrid MCDM method is based on Promethee-II and Multi-Layer Perceptron model.

### 3. Determination of Criteria Weights

This section consists of two main methods. Multi-Layer Perceptron (MLP) and Promethee-II are used for determination of criteria weights and alternative selection, respectively.

#### 3.1. Multi-Layer Perceptron

An artificial neural network consists of artificial neural cells that form parallel connections to each other in various layers. Artificial neural networks have a wide variety of network structures and models. There are many artificial neural network models (Perceptron, MLP, SOM, ART etc.) that can be used for different purposes. The most common one for these models is the Multi-Layer Perceptron (MLP), which is a multi-layer feedforward artificial neural network that is used in this study.

In MLP networks, neurons are organized in layers. The first layer is input layer. Input data exist in this layer. The layer between input and output layer is called as hidden layer. A MLP network can have multiple hidden layers. Figure 1 gives a general MLP network structure.



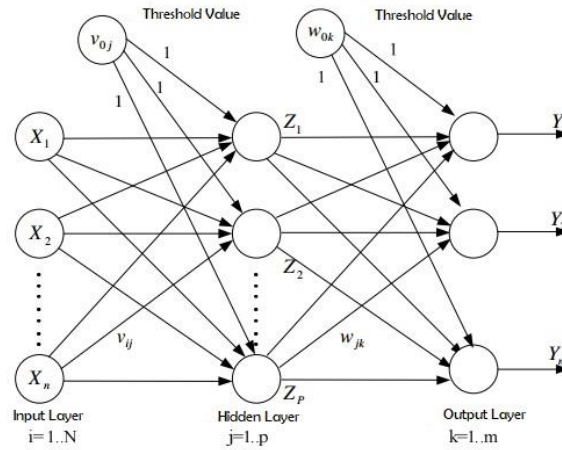


Figure 1. Multi-layer feed forward MLP

The steps of this architecture are given in Figure 2 (Gardner and Dorling, 1998). According to Algorithm 1, firstly initial weights and bias values are chosen randomly. In order to find  $Z_i$  values which are input data in hidden layer, these values are processed with input data. The obtained result is given as input to any activation function such as sigmoid, tangent. As a result,  $Y_k$  values are obtained by  $Z_i$  values which is given in step 2.3.1. With latest error value, feed forward pass process is completed. The next step is backward pass. In this process,  $V_{ij}$ ,  $W_{jk}$ ,  $b_{j,k}$  values are updated which is given in step 2.6. An epoch is completed with applying all data of feed forward and backward processes. Stopping criteria are determined by decision makers. These criteria may be the number of epoch, not change of weights, etc.

---

**Algorithm 1:** MLP Algorithm

---

**Input :** Train and Test Data  
**Output :** Output and Weight values

- 1: Initialize bias ( $b$ ) and random weight ( $V, W$ ) values
- 2: **while** (until stop criteria)
  - % Feedforward pass
  - 2.1: **for**  $i:=1$  to  $n$  **do**
    - 2.1.1:  $Z_i = activation\_function(\sum_{j=1}^p X_j * V_{ji} + b_i)$
  - 2.2: **end for**
  - 2.3: **for**  $k:=1$  to  $m$  **do**
    - 2.3.1:  $Y_k = activation\_function(\sum_{j=1}^p Z_j * W_{jk} + b_k)$
  - 2.4: **end for**
  - 2.5:  $error = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (Y_{desired} - Y_k)^2$
- % Backward pass, update process
- 2.6:  $\Delta W_{jk} = \Delta W_{jk} - \alpha \frac{\partial error}{\partial W_{jk}}$
- 2.7:  $\Delta V_{ij} = \Delta V_{ij} - \alpha (\sum_p W_{pk} \delta_p) * f'_i(Z_i) * X_j$   
 $\delta_p = (Y_{desired} - Y_p) * f'_p(Z_p)$
- 2.8:  $\Delta b_{j,k} = \Delta b_{j,k} - \alpha \frac{\partial error}{\partial b_{j,k}}$
- 3: **end while**

---

Figure 2. MLP Algorithm

### 3.2. Promethee II

MCDM determines which is the best among all possible efficient alternatives, according to the decision-maker (DM) preferences, taking into account several criteria. There are many techniques that have been developed to help decision-makers rank alternatives according to many criteria. Promethee is one of the outranking models. It has been developed from the difficulties in the implementation phase of current prioritization methods in the literature (Dagdeviren and Eraslan, 2008). The method evaluates alternatives in decision making problems based on determined preference functions and determines partial and complete ranking by means of binary comparison techniques. The Promethee method is one of the most recently developed methods of the MCDM methods and has been licensed by Brans and developed by Brans and Vincke in 1985 (Brans and Vincke, 1985). The basic features

of the Promethee method are simplicity, openness and balanced formation. The method uses preference functions while generating ranking. In order to make his decision easily for the decision maker, all the parameters must be clearly defined. Promethee method allows both partial ordering (Promethee I) and complete ordering (Promethee II) on the final number of alternatives (Brans et al., 1986). The success of the methodology is basically due to its mathematical properties and to its particular friendliness of use (Brans and Mareschal, 2005).

In this study, it is focus to find the complete order of the determined airline companies. So, Promethee-II method is used for ranking. Seven general steps for performing the Promethee II method can be listed as (Senkayas and Hekimoglu, 2013):

**Step 1:** As a first step, the decision maker is asked to define decision points and evaluation factors. Then, the data sets are created by determining the importance weights of the evaluation factors (criteria).

**Step 2:** This step determines the preference functions. The selected preference functions indicate the structure and internal relations of the criteria.

**Step 3:** Binary comparisons of decision points are made for each criterion, taking into account the preference functions, and common preference functions are determined.

**Step 4:** In this step preference indexes are determined using common preference functions.

**Step 5:** Positive and negative superiority values are determined for decision points.

**Step 6:** The partial sequence is determined with Promethee I. There are three situations in this comparison. The situations in which the superiority of one decision point to another, difference of decision points and decision points cannot be compared with each other.

**Step 7:** Promethee II determines the exact order of the decision points.

#### 4. Feature Analysis for Multi-Criteria Rating Values of Airline Companies

In this section, we explain the data set used and the experiments performed.

##### 4.1. Dataset

The main goal of the companies is to consistently provide customer satisfaction. To reach this goal, the companies try to measure their customer satisfaction in different ways to see their good and missing aspects. Skytrax, a consultancy firm located in London, United Kingdom, conducts research and consultancy mostly within the aviation sector (Perezgonzalez, 2011). This company conducts research for airlines to find the best cabin staff, airport, airline, airline lounge, in-flight entertainment, on board-catering and several other elements of air travel. In this study, Skytrax's airline rankings, which are publicly available in Skytrax's interactive web site ([www.airlinequality.com](http://www.airlinequality.com)), are used. There are latest travel reviews and customer trip ratings use for 681 airlines and 728 airports across the world. Because there are too much passenger data and airline companies, in this study Air China, Lufthansa, United, ANA and THY airline companies are selected to be evaluated. So, the passenger data of these companies are used. Example of customer review data is demonstrated in Figure 3. In this study two data sets are used and we focus on such numerical ratings with other data given in Figure 3 (a) rather than comments in Figure 3 (b). Such ratings also represent useful information that customer has been flown in economy, premium economy or business class and whether the customer recommends or not recommends the airline company to potential customer audience.

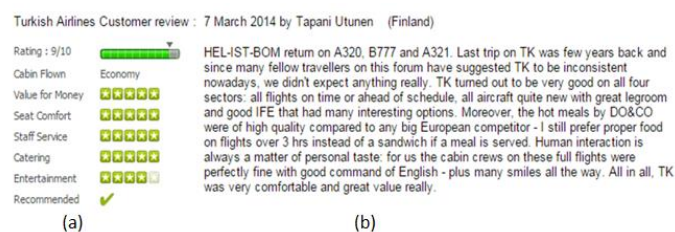


Figure 3. Customer reviews about flight service ([www.airlinequality.com](http://www.airlinequality.com))

For the first data set, we select the subset of all of user reviews about airlines which Kaya used in her work (Kaya, 2017). These are costumer review data given from 1 January 2014 to 31 December 2014. There are five airlines and it consists of 1494 users and 13 attributes. For us, numerical ratings are important so, data set consists of five sub ratings and an overall rating. These sub ratings are *value of money* (VM), *seat comfort* (SC), *staff service* (SS), *catering* (Cat) and *entertainment* (Ent). While sub ratings are shown with stars from 1 to 5, overall rating is shown with a bar from 1 to 10.

As the second data set used in this study, same airline companies are chosen like first data set but customer reviews change from 1 January 2015 to 31 December 2015. The difference from the first dataset is there are seven sub ratings in this dataset. These sub ratings are value of money (VM), seat comfort (SC), staff service (SS), catering (Cat), entertainment (Ent), *ground of service* (GS) and *wifi&connectivity* (WC). This dataset consists of 568 (United), 282 (Lufthansa), 97 (Air China), 304 (Turkish) and 61 (ANA) customer reviews.

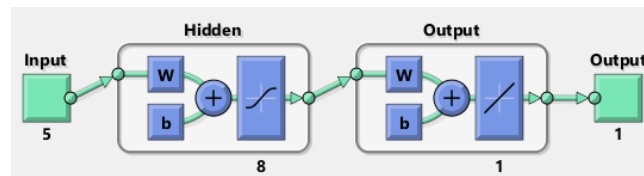
### 4.2. Experiment I

In this section, firstly to determine the criteria weights multi-layer perceptron (MLP), which is one of artificial neural network models, is applied to the first dataset. The dataset is classified as train and test. The train is 70 percent of the dataset; the rest is test. Architecture structure of MLP algorithm consists of five input (sub ratings) and an output (overall) neurons. Numbers of hidden neuron are tried to be determined by changing the numbers of hidden neuron according to the obtained error values. As error calculation, mean square error (MSE) is used.

**Table 1.** Error values according to changing numbers of neuron

Experiment	# of Hidden Neuron	# of Iteration	Train Error	Test Error
1	4	1000	1.7560	1.9045
2	6	1000	1.6590	1.9453
3	8	1000	1.5483	1.8614
4	10	1000	1.4626	2.1095
5	12	1000	1.3972	2.2521

According to Table 1, while the number of hidden neuron is 8, it can be observed that the error value is the smallest one. The MLP architecture consists of 5 input, 8 hidden and an output neuron as given in Figure 4.



**Figure 4.** MLP architecture according to the best number of hidden neuron

In the second step, the importance ranking between criteria is determined. Therefore, Promethee II technique is used. Commonly, decision makers give the weights of criteria based on their experiences in Promethee II. But, in this study we use the weights which are obtained from MLP algorithm. These weights are the weights between input and hidden layer. The weight values are selected maximum for each criterion. Table 2 and Table 3 give the weight values, criteria values for each alternative and statistical values of this criteria, respectively.

**Table 2.** The criteria values for each alternative

	VM	SC	SS	Cat	Ent
Air China	3,45	3,96	3,69	3,47	2,29
ANA	3,27	3,30	3,32	3,27	2,45
Lufthansa	3,08	4,50	4,10	3,10	2,42
THY	2,82	3,70	3,54	3,61	3,05
United	2,71	3,60	3,27	2,01	2,03
Weights	3,32	22,89	2,20	3,51	7,89

**Table 3.** Statistical values for each criterion (Min: Minimum, Max: Maximum, S.Dev: Standart Deviation)

	VM	SC	SS	Cat	Ent
Min	2,71	3,30	3,27	2,01	2,03
Max	3,45	4,50	4,10	3,61	3,05
Mean	3,07	3,81	3,58	3,09	2,45
S. Dev	0,27	0,40	0,30	0,57	0,34

Figure 5 shows the ranking of the criteria which is obtained by Promethee II.

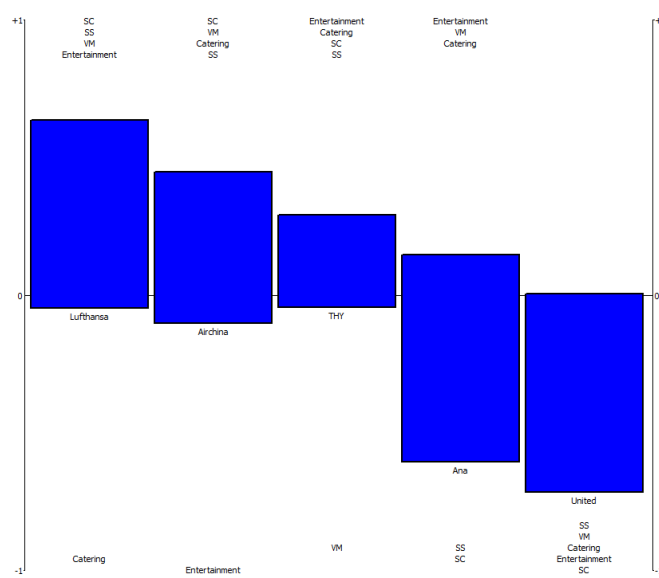


Figure 5. Phi values of criteria for each alternative

The parts shown in blue in Figure 5 represent the passenger numbers in the alternatives. When we examine important ranking of Lufthansa and Air China airlines, seat comfort criteria place the first rank. We can see that this criterion is the least important criterion for ANA and United. But while catering is the last rank for Lufthansa, for Air China entertainment locate to this rank. Generally, seat comfort, entertainment and value of money have high level importance, there is vice versa for staff service and catering.

We see that preference priority of Lufthansa is higher than other airlines. Air China, THY, ANA and United follow to Lufthansa in Figure 6.

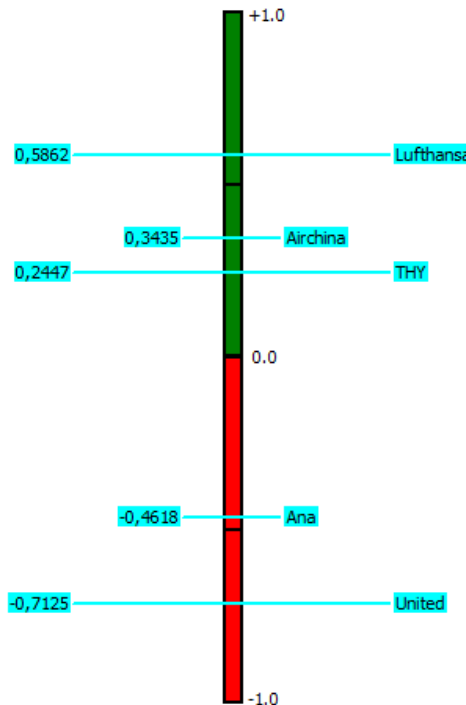


Figure 6. The ranking of each alternatives

Figure 7 shows the selection rank between alternatives in terms of certain criteria.

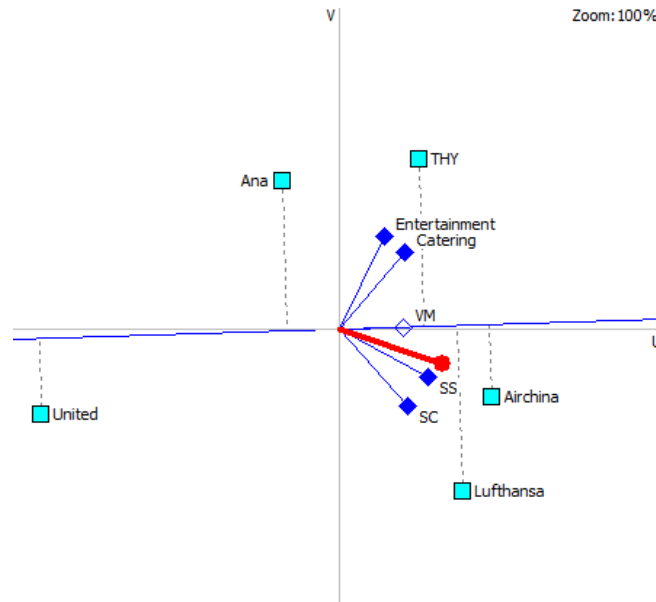


Figure 7. The selection ranks in terms of value of money (VM)

There are selection priorities of airlines according to VM in Figure 7. According to the figure, while value of money is the best selection for Air China, it is the worst selection for Lufthansa and United. If another criterion is wanted to be selected, then a straight line is drawn passed from this criterion and the origin. The alternatives which are close to the drawn line are determined as the best selection in the sense of this criterion. It is assumed that this criterion is entertainment. According to straight line passed from this criterion and origin, we can say that the best choices are THY and ANA. The worst choices are United and Lufthansa for this criterion. By means of these results, according to important criteria of passenger that will travel, this analyses are performed and passenger can travel with the most suitable alternative firm.

### 4.3. Experiment II

The difference from previous section of this section is that experiments are applied on a different dataset. To the dataset which contains 1312 passenger is firstly applied MLP. The train is 70 percent of the dataset, the rest is test. Architecture structure of MLP algorithm consists of seven input (sub ratings) and an output (overall) neurons. We try to determine numbers of hidden neuron by changing the numbers of hidden neuron according to the obtained error values. Table 4 gives error values according to exchanged number of neuron for hidden layer.

Table 4. Error values according to changing numbers of neuron

Experiment	Number of Hidden Neuron	Number of Iteration	Train Error	Test Error
1	4	1000	1.2244	1.4202
2	6	1000	1.0429	1.7257
3	8	1000	1.0500	1.4280
4	10	1000	0.9361	1.3983
5	12	1000	0.8991	1.7892

When Table 4 is examined, we see that train and overall error are the lowest while numbers of neuron to hidden layer are 10. The error values increase after 10. According to the obtained results, we determine as the optimal number of neuron for hidden layer is 10. The architecture consists of input layer, hidden layer, output layer which has 7, 10 and 1 neuron, respectively. This architecture is displayed in Figure 8.

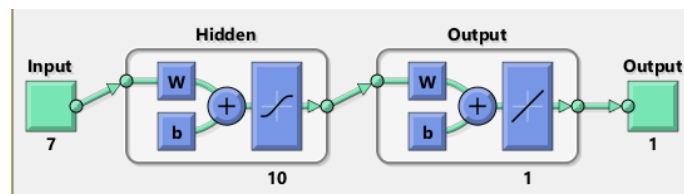


Figure 8. MLP architecture according to the best number of hidden neuron

The last operation is to determine the rank of criterion and alternatives. Weight values which are determined at first step are used by Promethee II. While values of the criteria for each alternative are given in Table 5, Table 6 gives the statistical side of these values. All of these values are used by Promethee then we determine ordering of each criteria for alternatives.

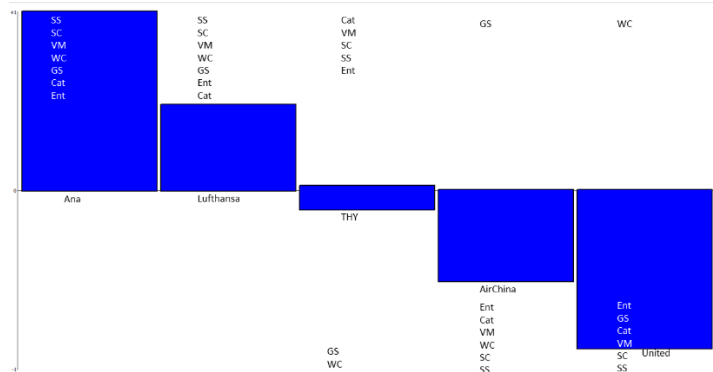
**Table 5.** The criteria values for each alternative

	VM	SC	SS	GS	WC	Cat	Ent
<b>Air China</b>	2,80	2,73	2,52	1,53	0,14	2,26	1,78
<b>ANA</b>	3,98	3,72	4,65	2,60	0,73	3,91	3,26
<b>Lufthansa</b>	3,75	3,64	4,12	2,23	0,70	3,67	3,20
<b>THY</b>	3,44	3,25	3,38	1,52	0,44	3,73	3,03
<b>United</b>	2,20	2,38	2,48	1,48	0,69	1,92	1,81
<b>Weights</b>	8,89	16,73	2,34	6,31	7,07	2,83	0,18

**Table 6.** Statistical values for each criteria (Min: Minimum, Max: Maximum, S.Dev: Standart Deviation)

	VM	SC	SS	GS	WC	Cat	Ent
<b>Min</b>	2,20	2,38	2,48	1,48	0,14	1,92	1,78
<b>Max</b>	3,98	3,72	4,65	2,60	0,73	3,91	3,26
<b>Mean</b>	3,23	3,14	3,43	1,87	0,54	3,10	2,62
<b>S. Dev</b>	0,65	0,52	0,86	0,46	0,23	0,83	0,67

Figure 9 gives phi values of 7 criteria values in each alternative. While there is too little passenger in THY, ANA is the most crowded company. For ANA and Lufthansa passengers, their criteria are similar. For the passengers that travel with this airline, staff service and seat comfort are the most important criteria. But these criteria are the last rank for Air China and United. Figure 10 shows phi values of alternatives.



**Figure 9.** Phi values of criteria for each alternative

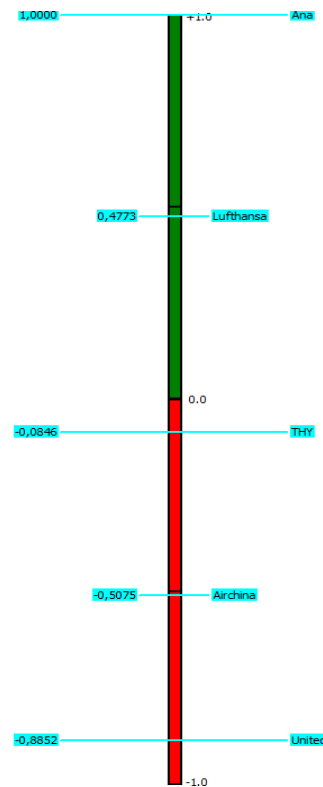


Figure 10. The ranking of each alternatives

ANA which has the highest phi value, takes places on top. ANA is followed by Lufthansa. United, which has the lowest phi value, is in the last rank.

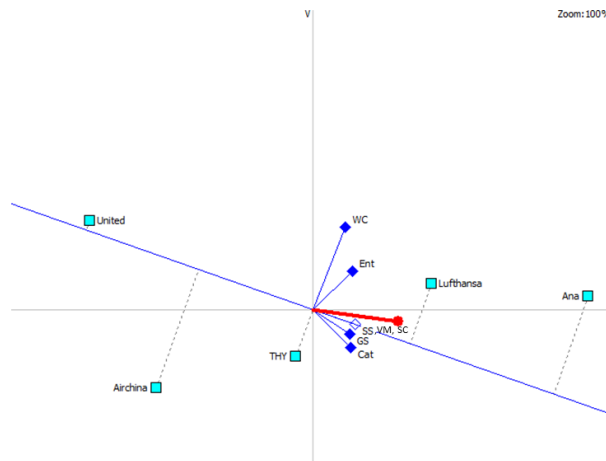


Figure 11. The selection ranks in terms of value of money (VM)

The importance of each criterion in terms of alternatives is shown in Figure 11. There is an important point in Figure 11. Value of money, staff service and seat comfort are located in the same point. This examination is performed in terms of value of money. We conclude the result which United airline firm is the cheapest while ANA and Air China airline firm is the most expensive of all the airlines. This comment is valid for staff service and seat comfort. According to staff service and seat comfort, United is the best firm but the other firms are not. In addition to these comments, Lufthansa and ANA is similar with one another while United varies from the others.

5. Results

Market changes continuously from the past to the present. In the past, while companies are trying to produce products according to their capabilities and deliver them to customers, nowadays products are being tried to be produced in the direction of customers. There is a rule of *what this product is for*, not *what the product is*. The process is developing in a customer-focused manner. Companies want to access to useful information about customer preferences to develop these products. If this useful information about customers is collected and analysed appropriately, companies can use this information to develop different strategies. These analyses allow that companies take a step further in a competitive environment.

In the competitive airline industry, the companies have to manage their resources appropriately to meet their customers' expectations. Consequently, in this study, passengers' reviews of airline companies are analysed based on the annual changes of airline companies using data analysis techniques. Multi-criteria ratings of passengers are analysed by Promethee II. A different approach has been adopted here where the weight values required for the Promethee II are determined by the decision maker. Nevertheless, we try to obtain weight values using MLP which is one of the most common artificial neural network models. These operations are performed on two different sets of data. As a result of these operations, importance orders are similar in terms of criteria in these experiments. While seat comfort, entertainment and value of money qualities are important for passengers in the first experiment, the second experiment is seen to receive staff service instead of entertainment criteria. While the ranking in Experiment I was obtained as Lufthansa, Air China, THY, ANA and United, in Experiment II the order of preference in terms of all airline companies is ANA, Lufthansa, THY, Air China and United. An interpretation can be made that the ANA airline company develops different strategies within a year and increases passenger satisfaction. These developments have not been observed in THY and United companies. It can be said that Air China, which ranks high in Experiment I, has experienced a strategic decrease in the next year. With all these results, it is possible to consider the passenger service priorities in order to improve the quality of the airline customer relationship and to make recommendations that airline companies can develop different tactics like increasing the comfort quality. The airline companies take strategic management decisions for the future through these results.

In this study, the weight values required for Promethee II can be obtained by using different methods. Therefore, in future, the studies can be continued using metrics such as regression and criteria variance or using different methods as Entropy, AHP, ANP, and Fuzzy AHP. A fuzzy set can be used to eliminate the uncertainty that exists in multi-criteria decision-making problems. So, we can perform multi-criteria fuzzy decision making with AHP in future.

### Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

### References

- Barros, C., P. and Wanke, P., 2015. An analysis of African airlines efficiency with two-stage TOPSIS and neural networks. *Journal of Air Transport Management*, 44-45, 90-102.
- Bongo, M.F., Alimpangog, K.M.S., Loar, J.F., Montefalcon, J.A., Ocampo, L.A., 2017. An application of DEMATEL-ANP and PROMETHEE II approach for air traffic controllers' workload stress problem: A case of Mactan Civil Aviation Authority of the Philippines. *Journal of Air Transport Management*.
- Brans, J-P., Mareschal, B., 2005. Promethee Methods in: Multipler criteria decision analysis: State of the art surveys. *International Series in Operations Research and Management Science*, New York, Vol. 78.
- Brans, J-P. and Vincke, P., 1985. A preference ranking organization method: The PROMETHEE method for MCDM. *Management Science*, Vol. 31(6), 647-656.
- Brans, J-P., Vinckle, P., and Mareschal, B., 1986. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE Method. *European Journal of Operational Research*, Vol. 24, 228-238.
- Dagdeviren, M., and Eraslan, E., 2008. PROMETHEE sıralama yöntemi ile tedarikçi seçimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Vol. 23(1), 69-75.
- Feng, C.M. and Wang, R. T., 2000. Performance evaluation for airlines including the consideration of financial ratios. *Journal of Air Transport Management*, 133-142.
- Gardner, M. W. and Dorling, S. R., 1998. Artificial Neural Networks (the Multilayer Perceptron) a review of applications in the atmospheric sciences. *Atmospheric Environment*, Vol. 32, No. 14-15, 2627-2636.
- Gourdin, K., 1998. Bringing quality back to commercial travel. *Transport Journal*, 23-29.
- Jarvis, R.A. and Patrick, E.A., 1973. Clustering using a similarity measure based on shared near neighbors. *IEEE Transaction on Computers*, C22, 1025-1034.
- Kaya, T., 2017. Hybrid approach on airline companies. 8<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium, IATS'17, Elazığ.
- Kurtulmusoglu, F.B., Can, G.F. and Tolon M., 2016. A voice in the skies: Listening to airline passenger preferences. *Journal of Air Transport Management*, Vol.57, 130-137.
- Lacic, E., Kowald, D., Lex, E., 2016. High enough? Explaining and predicting traveler satisfaction using airline review. *Proceedings of the 27th ACM Conference on Hypertext and Social Media*, Halifax, Canada.
- Liou, J.J.H., Hsu, C-C., Yeh, W-C., 2011. Lin, R.H., Using a modified grey relation method for improving airline service quality. *Tourism Management*, Vol. 32, 1381-1388.
- Liou, J.J.H. and Tzeng, G.H., 2010. A dominance-based rough set approach to customer behaviour in the airline market. *Information Sciences*, 180, 2230-2238.



- Miranda, H. S. and Henriques, R. (2013). Building clusters for CRM strategies by mining airlines customer data. 8th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), 1-5.
- Oz, Y. and Koksall, C.D., 2016. Analyzing efficiencies and Total Factor Productivities of Star Alliance Member Airlines. *The Online Journal of Science and Technology*, Vol. 6, Issue 1, 5-12.
- Perezgonzalez, J. D. and Gilbey, A., 2011. Predicting skytrax airport rankings from customer reviews. *Journal of Airport Management*, 5, 336.
- Senkayas H., Hekimoğlu H., 2013. Çok kriterli tedarikçi seçimi problemine PROMETHEE yöntemi uygulaması. *Verimlilik Dergisi*, 63-80.
- Strehl, A., Ghosh, J. and Mooney, R., 2000. Impact of similarity measures on web-page clustering. *Workshop on Artificial Intelligence for Web Search (AAAI 2000)*, 58-64.
- Tsaur, S.H., Chang, T.Y. and Yen, C.H., 2002. The evaluation of airline service quality by fuzzy MCDM. *Tourism Management*, 107-115.
- Vassilev, V., Genova, K, and Vassileva M., 2005. A Brief survey of multicriteria decision making methods and software systems. *Cybernetics and Information Technologies*, Vol. 5, No 1, 3-13.
- Vela, M. R., and Garcia, E. M., 2010. A segmentation analysis and segments profile of budget air travelers. *Cuadernos de Turismo*, 26, 235-25.
- Wang, H., Wang, W., Yang, J. and Yu, P.S., 2002. Clustering by pattern similarity in large data sets. *Special Interest Group on Management of Data (SIGMOD 2002)*, Madison, Wisconsin, USA, 394-405.
- Wang, R., Ho, C-T., Feng, C-M. and Yang, Y-K., 2004. A comparative analysis of the operational performance of Taiwan's major airports. *Journal of Air Transport Management*, 353-360.



## BİYOYAKIT TEDARİK ZİNCİRİ AĞ TASARIMI ÇALIŞMALARINI İÇİN ÖZ DÜZENLEYİCİ HARİTALAR

Fatih ÖZTÜRK<sup>1\*</sup>, Ali Osman KUŞAKÇI<sup>2</sup>, Berk AYVAZ<sup>3</sup>, Melike SIRAKAYA KARAKOÇ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Ibn Haldun Üniversitesi, Yönetim Bilimleri Fakültesi, İşletme Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup>İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı,  
Biyoyakıt,  
Yenilenebilir Enerji,  
Karar Verme.

### Öz

Son yıllarda çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi artmaktadır. Ülkemizde Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından, 2013 yılından itibaren benzine ve motorine yerli katkı olarak, oranları her yıl arttırılmak üzere biyodizel ve etanol ilave zorunluluğu getirilmiştir. Bu da yenilenebilir enerji kaynakları için etkin ve optimal yeşil tedarik zinciri ağı tasarımı çalışmalarının yapılmasını gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda karar vericiler, ekonomik gelişme sağlayan, çevre hassasiyeti olan ve sosyal refahı sağlayan sürdürülebilir çözümler üretmek için biyoenerji, rüzgâr, güneş, dalga, gelgit vs. gibi yenilenebilir enerjilere odaklanılmışlardır. Bu çalışmada biyoyakıtların tedarik zinciri ağ tasarımları ile ilgili yapılmış geçmiş çalışmalara yer verilmiş ve çalışmalar; amaçları, karar değişkenleri, kısıtları, kullanılan optimizasyon metodu ve sonuçları açısından analiz edilerek değerlendirilmiştir. İncelenen çalışmalar, yapay sinir ağlarının özel bir çeşidi olan öz düzenleyici haritalar (Self Organizing Maps-SOM) yöntemi kullanılarak kümelenmiş ve literatürdeki boşluklar tartışılmıştır. Literatürün incelemesi ve çalışmaların kümelenmesini içeren bu makale, biyoyakıt tedarik zinciri ağ tasarımı ile ilgili çalışma yapacak araştırmacılar için yol gösterici niteliktedir.

## SELF ORGANISING MAPS FOR BIOFUEL SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN STUDIES

### Keywords

Supply Chain Network  
Design,  
Biofuels,  
Renewable Energy,  
Decision Making.

### Abstract

Interest in environmentally friendly, renewable energy sources has been increasing. Energy Market Regulatory Authority (EPDK) has been obliged to add biodiesel and ethanol as domestic additives to petrol. This makes it necessary to make efficient and optimal green supply chain network design studies for renewable energy sources. In this context, decision makers have focused on renewable energies to produce sustainable solutions that provide economic development, environmental sensitivity and social welfare. In this study, previous studies on biofuel supply chain network designs were analyzed in terms of their work, objectives, decision variables, constraints, optimization method used and results. The studies were clustered using a special type of artificial neural networks Self Organizing Maps method and the densities of the features were shown in the study. This article, which includes a review of the literature and a cluster of studies, is a guide for researchers working on biofuel supply chain network design.

### Alıntı / Cite

Öztürk, F., Kuşakçı, A. O., Ayvaz, B., Karakoç Sırakaya, M., (2020). Biyoyakıt Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı Çalışmaları İçin Öz Düzenleyici Haritalar, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 345-356.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

F. Öztürk, 0000-0003-4113-055X  
A. O. Kuşakçı, 0000-0003-1411-0369  
B. Ayvaz, 0000-0002-8098-3611  
M. Sırakaya Karakoç, 0000-0002-3389

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	07.01.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	26.03.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: fatih.ozturk@medeniyet.edu.tr, +90-216-280-3333

## 1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda küresel ısınma, hava kirliliğinin artması, iklim değişiklikleri, değişkenlik gösteren akaryakıt fiyatlarının yanı sıra tabii kaynakların hızla tükenmesi ve sanayileşme ile paralel bir şekilde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin yüksek enerji talepleri, yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına olan ilginin gittikçe artmasına sebep olmuştur. Bu gelişme de yenilenebilir enerji kaynakları için etkin ve optimal yeşil tedarik zinciri ağı tasarımı çalışmalarının yapılmasını gerekli kılmaktadır (Ayvaz vd., 2018a).

Bu bağlamda karar vericiler, ekonomik gelişme sağlayan, çevre hassasiyeti olan ve sosyal refahı sağlayan sürdürülebilir çözümler üretmek için biyoenerji, rüzgâr, güneş, dalga, gelgit vs. gibi yenilenebilir enerjilere odaklanmışlardır. Özellikle biyoenerji üretim sistemleri, çevresel sorunlara da bağlı olarak, hızla tükenmekte olan ve yenilenemeyen geleneksel enerji üretim sistemleri yerine ikame olabileceği için son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Biyoenerji sınıfında biyokütle, biyoethanol, biyodizel, biyogaz, biyoalkoller vb. yakıt türleri bulunmaktadır. Etkin bir biyoyakıt tedarik zincirinin tasarımı, biyoyakıtların fosil yakıtlara karşı yeterliliğinin artırılmasında önemli bir role sahiptir. Bir biyoyakıt tedarik zinciri ağını en iyi şekilde tasarlamak için, birçok araştırmacı tarafından matematiksel programlama, simülasyon ve coğrafi bilgi sistemi vb. farklı metodolojiler uygulanmıştır. Ülkemizde biyodizel kullanımı ile ilgili olarak Resmi Gazete’de yayımlanan 27 Eylül 2011 tarih ve 28067 sayılı “Motorin Türlerine İlişkin Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ”e göre piyasaya arz edilen motorin türlerinin, yerli tarım ürünlerinden üretilmiş yağ asidi metil esteri(biyodizel) içeriğinin; 01/01/2014 tarihi itibarıyla en az %0,1, 01/01/2015 tarihi itibarıyla en az %0,2, 01/01/2016 tarihi itibarıyla en az %0,3 ve 16/07/2017tarihi itibarıyla %0,5 oranında olması zorunlu hale getirilmiştir (Ayvaz vd., 2018b). Ayrıca biyodizel üretimi için kullanılan yağlı tohumlar kurak bölgelerde de yetiştirilebileceği için tarıma elverişli olmayan bölgelerde de bu alanda istihdam artacak ve sosyal yönden de katkısı olacaktır.

Bu çalışmada biyoyakıtlar için tedarik zinciri ağı tasarımı çalışmaları sistemli yorumlamalar yapabilmesi amacıyla yapay sinir ağlarının bir çeşidi olan öz düzenleyici haritalar (Self Organizing Maps-SOM) yöntemiyle amaçları, karar değişkenleri, kısıtları, kullanılan optimizasyon metodu ve sonuçları dikkate alınarak incelenmiş ve kümelendirilmiştir. Karar vericilere destek olmak ve daha güvenilir değerlendirmeler yapabilmek adına, Karar Verme yöntemlerinin kullanılması bir çok araştırmacı tarafından önerilmiştir (Kuşakçı vd., 2019; Ozturk ve Kaya, 2020).

Çalışmanın bundan sonraki bölümünde literatür taraması yapılırken kullanılan metodoloji hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde incelenen çalışmalar için SOM yöntemi ile analizler ve değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuç bölümünde ise genel değerlendirme ve literatürdeki açıklar ele alınmıştır.

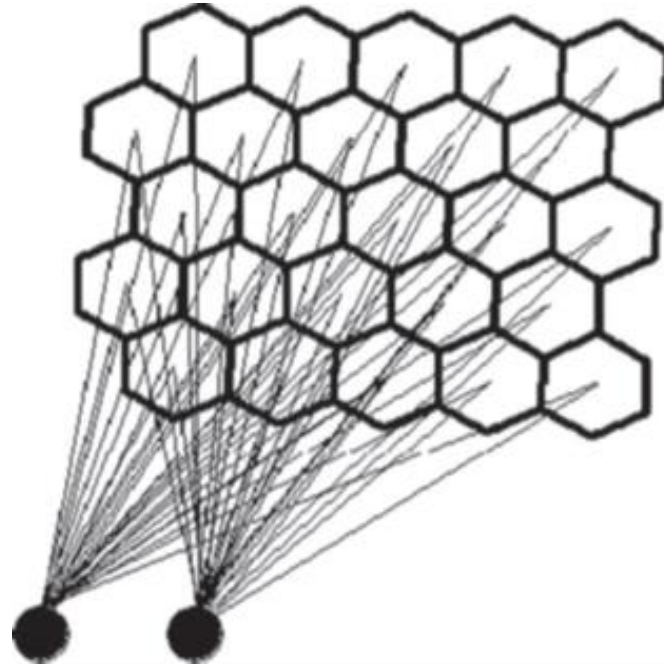
## 2. Metodoloji (Methodology)

### 2.1. Kümeleme Analizi (Cluster Analysis)

Kümeleme analizi, incelenen birimleri ortak özelliklerine göre belirli sayıda gruplara ayırarak, bu gruplar hakkında genel tanımlamalar yapmaya olanak veren çok değişkenli istatistiksel bir yöntemdir (Kaufman ve Rousseeuw, 1990). Kullanıcının amacı ve kullanım alanları düşünülerek farklı kümeleme analizleri mevcuttur. Bu istatistiksel analiz yöntemlerinin en yaygın olanları; k-ortalamlar yöntemi (MacQueen, 1967), bulanık c-ortalamlar yöntemi (Höppner, 2002) ve öz düzenleyici haritalar (Kohonen, 1982) yöntemidir.

### 2.2. Öz düzenleyici Haritalar (Self Organizing Maps-SOM)

Öz düzenleyici haritalar, özel bir çeşit yapay sinir ağı olan veri kümeleme ve görüntüleme yöntemidir. Öz düzenleyici haritalar ilk olarak Kohonen tarafından 1982 yılında geliştirilmiştir ve Kohonen ağları olarak da adlandırılmaktadır (Kohonen, 1982). Öz düzenleyici haritalar geniş verilere ait gruplamanın bilinmediği durumlarda, verilerin sistematik kümelendirilmesini amaçlamaktadır (Oğuzlar, 2005). Literatürde SOM yöntemi, su kaynaklarının gruplanması (Kalteh vd., 2008), renklerin tüketici davranışları üzerindeki etkisinin incelenmesi (Mostafa M. M., 2009), kış aylarındaki aşırı iklim değişikliklerinin incelenmesi (Cavazos, 2000), araç rotalama çalışmaları (Schwardt ve Dethloff, 2005), kağıt hamuru ve kağıt şirketlerine ait sektörel değişimlerin ve finansal performansın eş zamanlı karşılaştırılması (Länsiluoto vd., 2004), akademik kütüphanelerde yüksek kaynak ve hizmet kullanımı ile ilişkilendirilebilecek veri noktalarını tanımlanması (Ennis vd., 2013) gibi bir çok farklı alanda uygulanmıştır.



Şekil 1. Tipik bir SOM ağ yapısı (A typical SOM network structure)

Öz düzenleyici haritalarda diğer yapay sinir ağlarından farklı olarak, çıkış katmanındaki nöronların dizilimi çok önemlidir. Bu dizilim doğrusal, dikdörtgensel, altıgen veya küp şeklinde olabilir. Görselleştirme açısından dikdörtgensel ve altıgen şeklindeki dizilimler tercih edilmektedir. Şekil 1 de tipik bir SOM ağ yapısı gösterilmektedir (Kalteh vd., 2008).

Öz düzenleyici haritalar yönteminde kümeleme analizinde  $m$  tane değişken,  $n$  tane gruplama olduğu varsayılırsa her bir girdinin her bir düğüme olan uzaklığına bakılmaktadır. Kümeler oluşturulurken ilk olarak her düğümün ağırlık vektörü ( $w$ ) ile girdi vektörü ( $x$ ) arasındaki uzaklığı Eşitlik 1'de gösterilen Öklid bağıntısından yararlanılarak hesaplanabilir (Haykin, 2009).

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_j - w_{ij})^2} \quad (1)$$

Öz düzenleyici haritalara ait kümeleme sürecinin adımları Tablo 1'de yer almaktadır:

**Tablo 1.** SOM kümeleme sürecinin algoritması (Algorithm of the SOM clustering process)

<b>A1</b>	Ağırlık vektörüne 0 ile 1 arasında rasgele başlangıç değerleri ver.
<b>A2</b>	Her girdi ile ağırlık vektörü arasındaki uzaklığı Denklem 1 yardımı ile hesapla.
<b>A3</b>	Hesaplanan uzaklıklar arasındaki en küçük uzaklığa sahip olan düğümü (nöron) seç. Seçilen düğümü kazanan düğüm (winner node) olarak adlandır.
<b>A4</b>	Kazanan düğüm ve öğrenme parametresi ( $\alpha$ ) yardımıyla ağırlıkları aşağıdaki formülü kullanarak güncelle. Öğrenme parametresi $\alpha$ 'nın 0 ile 1 arasında, genellikle 0'a daha yakın, bir değer aldığı varsayılmaktadır (Alpaydın, 1998). $w_j(\text{yeni}) = w_j(\text{mevcut}) + \alpha[x - w_j(\text{mevcut})]$
<b>A5</b>	Durma kriteri sağlanıncaya kadar Adım 3 ve Adım 4 tekrarla.

SOM haritalar yöntemi ile çok boyutlu bir veri seti iki boyuta indirgenilebilir. Bu sayede veri seti karar vericiler tarafından kolayca değerlendirilebilmektedir (Özçalıcı, 2016).

Öz düzenleyici haritalarda kümeleme sonuçları elde edildikten sonra, verinin gerçek yapısını temsil edip etmediğini doğrulamak gerekmektedir. Kümeleme algoritmasından elde edilen küme bölünmelerinin uygunluğunu değerlendirmek için Dunn indeksini de (DI) içeren farklı küme geçerlilik indeksleri kullanılmaktadır (Azar vd., 2013). Bu çalışmada farklı kümeleme alternatiflerinden en uygun olanı belirlemek için her bir alternatifin DI değeri hesaplanacak ve karşılaştırılacaktır.

DI'de optimal kümelemeyi belirlemek için kullanılan ölçüt Eşitlik (2)'de verilmiştir.

$$DI = \min_{1 \leq i \leq n} \left\{ \min_{1 \leq j \leq n} \left\{ \frac{d(c_i, c_j)}{\max_{1 \leq k \leq n} \{d'(c_k)\}} \right\} \right\} \quad i \neq j \quad (2)$$

Eşitlik (2) 'de yer alan  $d(c_i, c_j)$  ifadesi,  $i$  ve  $j$  kümeleri arasındaki uzaklığı,  $\max_{1 \leq k \leq n} \{d'(c_k)\}$  ise  $k$  kümesi içindeki elemanlar arasındaki en büyük mesafeyi göstermektedir. DI değerinin temel amacı kümeler arasındaki mesafeyi en aza indirmek, küme içi uzaklıkları ise en büyükmektir. En büyük DI değerine sahip olan kümeleme en iyi gruplandırmayı verecektir.

### 2.3. SOM Yöntemi ile Kümeleme (Clustering with the SOM Method)

Bu çalışma yapılırken tedarik zinciri ağ tasarımı, biyodizel gibi anahtar kelimeler aratılmış ve matamatiksel modeli olan 28 makale incelenmiştir.

**Tablo 2.** Değişkenlerin alacağı değerler (Values that variables will take)

<b>Değişken</b>	Alabileceği Değerler
<b>Ağ Yapısı</b>	Açık Döngü Tedarik Zinciri (ADTZ) Kapalı Döngü Tedarik Zinciri (KDTZ)
<b>Model</b>	Doğrusal Programlama (DP), Doğrusal Olmayan Programlama (DOP), Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP), Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama (KTDOP)
<b>Amaç Fonksiyonu</b>	Tek Amaçlı Çok Amaçlı
<b>Belirsizliği ele alma Yöntemi</b>	Duyarlılık Analizi (DA) Senaryo Analizi (SA) Stokastik Optimizasyon Simülasyon Analizi Bulanık
<b>Çözüm Metodu</b>	Kesin Yöntemler Sezgisel Yöntemler Meta Sezgisel Yöntemler

**Tablo 3.** Değişkenlerin gösterim şekli (How variables are displayed)

Ağ Yapısı		Model				Amaç Fonksiyonu		Belirsizlikleri Giderecek Yöntemler					Çözüm Yöntemi		
ADTZ	KDTZ	DP	DOP	KTDP	KTDOP	Tek	Çok	Duyarlılık Analizi	Senaryo Analizi	Simülasyon Analizi	Stokastik	Bulanık	Kesin	Sezgisel	Yarı Sezgisel
1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0

Makalelerde kullanılan ağ tasarımı yaklaşımlarının temel karakteristiğini yansıtacak şekilde bazı değişkenler belirlendi. Kümeleme yöntemi için dikkate alınan değişkenler şu şekildedir: "Ağ yapısı", "Model", "Amaç Fonksiyonu", "Belirsizliği ele alma yöntemi" ve "Çözüm yöntemi". Bu değişkenlerin alacağı değerler de Tablo 2'de gösterilmiştir. Buna göre her bir çalışma Tablo 2'de verilen ayırt edici başlıklara göre incelenmiş ve çalışmada kullanılan yöntemle göre değişken değerleri saptanmıştır. Burada değişkenlerin alabileceği değerlerin karşılıklı dışlayan değerler olmadığını; yani, bir çalışmanın örneğin „Belirsizliği Ele Alma Yöntemi“ açısından hem simülasyon hem senaryo analizi kullanabilmesinin mümkün olduğunu belirtmeliyiz.

Çalışmada kullanılan değişkenler kategorik değerler aldığı için her bir değişkenin değeri 0-1 ikili değişkenlerinden biri ile tanımlanmıştır. Örneğin, KDTZ "1" değerini alıyorsa "problemin ağ yapısı kapalı döngü tedarik zinciri olarak tasarlanmıştır" anlamına gelecektir.

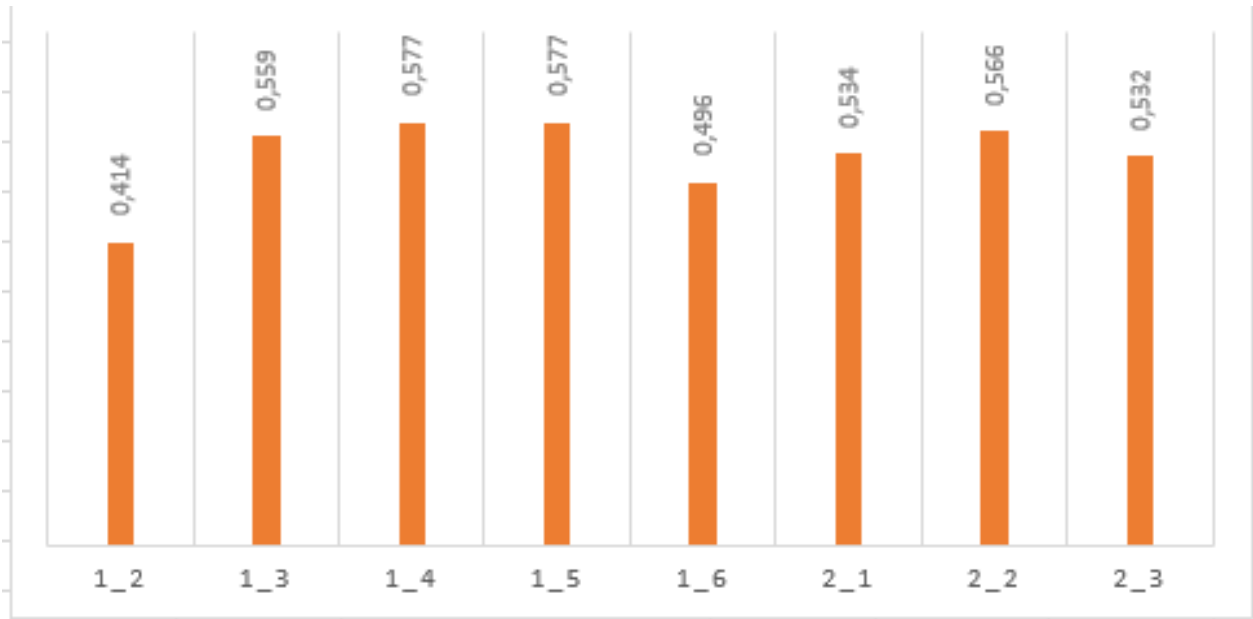
İncelenen çalışmalardan yola çıkarak değişkenlerin gösterimine çizelge yardımıyla bir örnek verirsek; Azadeh ve Arani (2016) İran'da biyodizel yakıtlar için tedarik zinciri ağ tasarımı çalışmasını gerçekleştirmiştir. Açık döngü olarak tasarlanan ağ tek amaçlı ve karma tamsayılı doğrusal programlamaya (KTDP) göre modellenmiştir. Kurulan model deterministik olduğu için çözümde kesin (exact) yöntemler kullanılmıştır ve GAMS yazılımının CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür.

Buna göre Azadeh ve Arani (2016) çalışmasında kullanılan değişkenler, verilen bilgiler doğrultusunda Tablo 3'de gösterilen değerleri alacaktır.

Çalışmada biyoyakıt tedarik zinciri ağ tasarımı konusunda yayınlanan 28 makaleden yararlanılmıştır. Kümeleme analizinde küme sayısı ile ilgili farklı yaklaşımlar mevcuttur. Değerlendirdiğimiz 28 makale için bir yalaşıma göre 2,8 civarında ( $28\% \cdot 10$ ), diğer bir yaklaşıma göre 5,2 civarında (veri sayısının karakökü kadar) küme olması beklenmektedir (Ercan ve Kayakutlu, 2015).

Bu amaçla, küme sayıları 2 ile 6 arasında olacak biçimde iki boyutlu topolojiler denenmiş, içerisinde boş küme bulundurmayan 1x2, 1x3, 1x4, 1x5, 1x6, 2x1 ve 2x2, 2x3 topolojileri dikkate alınmıştır. Dikkate alınan topolojiler için ise gruplamaların geçerliliği hakkında yorum yapabilmek için DI hesaplanmıştır. Öz düzenleyici haritalarda rassal etkileri ortadan kaldırmak için 30 bağımsız deneme yapılmıştır.

Bu denemeler sonucunda 1x4 ve 1x5 boyutlarındaki topolojilerin 0,577 ile en yüksek ortalama DI değerlerini verdiği görülmüştür. Elimizde bulunan makale sayısı dikkate alınarak kümeleme işlemi için 1x4 topolojisi seçilmiştir. Analizi gerçekleştirmek ve şekilleri çizmek için MATLAB programı kullanılmıştır.



Şekil 2. Topolojilerin ortalama Dunn Index değerleri (Average Dunn Index values of topologies)

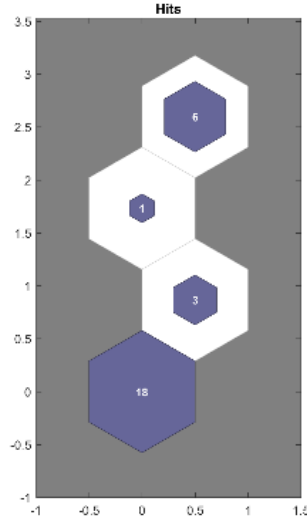
Yapılan literatür taraması sonucu, biyoyakıtların "Tedarik zinciri ağ tasarımı" problemlerine ilişkin ele alınan 28 çalışmaya ait detaylı bilgiler Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Biyoyakıtların tedarik zinciri ağ tasarımı üzerine literatür taraması özeti (Literature review on supply chain network design of biofuels)

Çözüm Yöntemi	Ağ Yapısı		Modelleme Tekniği											Çözüm Yöntemi			
	ADTZ	KDTZ	Model				Amaç Fonksiyonu		Belirsizliği Gidermek İçin Kullanılan Yöntemler					Kesin	Sezgisel	Meta-Sezgisel	
			DP	DOP	KTDP	KTDOP	Tek	Çok	D.A	S.A	Stokastik	Simülasyon	Bulamık				
Babazadeh vd.	✓					✓		✓		✓						✓	
Babazadeh	✓				✓		✓		✓							✓	
Azadeh ve Arani	✓				✓		✓		✓							✓	
Mohseni vd.	✓				✓		✓		✓							✓	
Rincón vd.	✓			✓				✓			✓					✓	
Jiang ve Zhang	✓				✓			✓		✓							✓
Marufuzzaman vd.	✓				✓		✓				✓		✓			✓	
Babazadeh vd.	✓		✓				✓									✓	
Andersen vd.	✓				✓		✓		✓	✓						✓	
Avami	✓			✓			✓			✓						✓	
Moncada vd.	✓																
Leão vd.	✓																
Hombach vd.	✓						✓		✓		✓		✓		✓	✓	
Leão vd.	✓				✓		✓		✓	✓						✓	
Hombach vd.	✓				✓		✓		✓							✓	
Mohseni ve Pishvae	✓			✓			✓		✓							✓	
Yılmaz Balaman ve Selim	✓				✓			✓	✓					✓		✓	
Ivanov ve Stoyanov	✓				✓			✓			✓					✓	
Duarte vd.	✓				✓		✓		✓	✓						✓	
Najmi vd.	✓			✓			✓			✓						✓	
Bai vd.	✓				✓		✓		✓	✓						✓	✓
Zhang vd.	✓				✓		✓			✓	✓					✓	
Cáceres vd.	✓			✓	✓		✓		✓							✓	
Meyer vd.	✓		✓		✓			✓	✓							✓	
Ren vd.	✓		✓				✓									✓	
Gonela vd.	✓						✓					✓					
Pasandideh vd.	✓							✓					✓				
Azadeh vd.	✓			✓				✓		✓	✓		✓			✓	
Liu vd.	✓				✓				✓	✓	✓					✓	
Li ve Hu	✓				✓			✓					✓			✓	

### 3. İncelenen Çalışmaların Kümelere Göre Değerlendirilmesi (Evaluation of the Reviewed Studies According to Clusters)

Öz düzenleyici haritalar yöntemi kullanılarak yapılmış kümeleme analizi sonucunda 1x4 topolojisinde yer alan kümelemenin, incelenenler arasında en iyi kümeleme olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 3'de en iyi gruplama sonucunu gösteren topoloji ve her küme içerisinde yer alan çalışma sayısına yer verilmiştir.



**Şekil 3.** 1x4 topoloji yapısı ve kümelerin eleman sayıları (1x4 topology structure and number of elements of sets)

Her grupta bilimsel çalışmalara ait yazar ve çalışmaların yapıldığı yıl bilgisi Tablo 5'te verilmektedir. Tablo 6, en iyi kümelemeyi veren topolojiye göre her bir kümenin, değişkenler temelinde ortalama değerlerini göstermektedir. Bu değerler incelenerek kümelerin gösterdiği özellikler için yorumda bulunmak mümkündür.

Birinci kümede ele alınan çalışmaların tamamı açık döngü tedarik zinciri olarak tasarlanmıştır ve modeller karmaşık tam sayılı doğrusal programlama olarak gruplandırılmıştır. Az sayıda çalışmada ise model olarak lineer ve lineer olmayan programlamadan yararlanılmıştır. Bu kümedeki çalışmaların tamamı tek amaçlı olarak kurulan modellerin çözümünde kesin çözüm yöntemleri kullanılmış, meta-sezgisel yöntemler ise hiç kullanılmamıştır. Modeldeki belirsizliklerin giderilmesi için çalışmaların neredeyse tamamında duyarlılık analizlerine yer verilmiştir. Duyarlılık analizlerinin yanı sıra az sayıda çalışmada ise senaryo ve simülasyon analizinden yararlanılmıştır.

İkinci kümede ele alınan çalışmalarda açık döngü tedarik zinciri olarak, tek ve çok amaçlı modeller tasarlanmıştır. Kümedeki tüm modeller lineer olmayan programlama olarak modellenmiş ve çalışmalar kesin yöntemler ile çözümlenmiştir. Kümedeki çalışmalarda belirsizlikler senaryo analizi yapılmıştır.

**Tablo 5.** 1x4 topolojisindeki kümelerin elemanları (Elements of sets in 1x4 topology)

Küme 1	
Yazar	Yıl
Babazadeh	2017
Azadeh ve Arani	2016
Mohseni vd.	2016
Marufuzzaman vd.	2014
Babazadeh vd.	2015
Andersen vd.	2012
Moncada vd.	2017
Leão vd.	2011
Hombach vd.	2016
Mohseni ve Pishvae	2016
Bai vd.	2016
Zhang vd.	2016
Cáceres vd.	2015
Duarte vd.	2016
Ren vd.	2015



Tablo 5. Devamı (Continued)

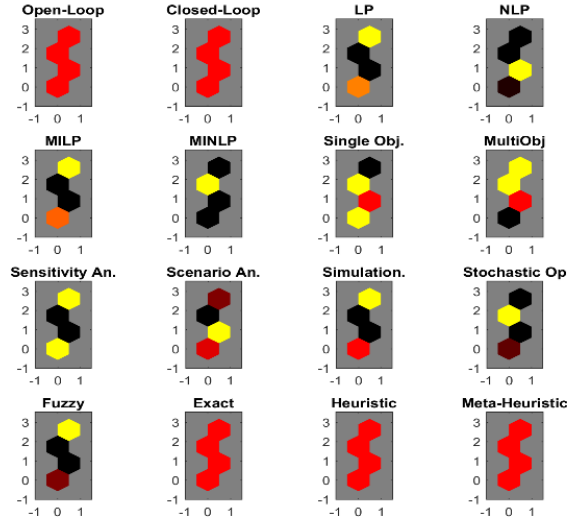
Yazar	Yıl
Gonela vd.	2015
Azadeh vd.	2014
Li ve Hu	2014
<b>Küme 2</b>	
Yazar	Yıl
Avami	2012
Rincón vd.	2015
Najmi vd.	2016
<b>Küme 3</b>	
Yazar	Yıl
Pasandideh vd.	2015
<b>Küme 4</b>	
Yazar	Yıl
Jiang ve Zhang	2016
Yılmaz Balaman ve Selim	2016
Ivanov ve Stoyanov	2016
Meyer vd.	2015
Liu vd.	2014
Babazadeh vd.	2017

Üçüncü kümede de ele alınan çalışma açık döngü tedarik zinciri olarak tasarlanmış olup, karma tamsayı doğrusal olmayan programlamaya göre modellenmiştir. Bu kümedeki çalışmayı diğer kümelerden ayıran özellik ise modelin çözümünde sezgisel yöntemlerin kullanılmasıdır. Belirsizliklerin giderilmesinde ise stokastik optimizasyon analizlerinden yararlanılmaktadır.

**Tablo 6.** 1x4 topolojisine göre her küme için değişkenlerin ortalama değeri (Average value of variables for each cluster based on 1x4 topology)

NODE	Ağ Yapısı		Model				Amaç Fonksiyonu		Belirsizlikleri Giderecek Yöntemler					Çözüm Yöntemi		
	ADTZ	KDTZ	DP	DOP	KTDP	KTDP	Tek	Çok	Duyarlılık Analizi	Senaryo Analizi	Stokastik	Simülasyon	Bulamık	Kesin	Sezgisel	Yarı Sezgisel
<b>NODE (1,1)</b>	1	0	0,16	0,1	0,72	0	1	0	0,72	0,38	0,11	0,22	0,05	1	0,05	0
<b>NODE (1,2)</b>	1	0	0	1	0	0	0,66	0,33	0	1	0	0	0	1	0	0
<b>NODE (1,3)</b>	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
<b>NODE (1,4)</b>	1	0	0,33	0	0,66	0,16	0,16	0,83	0,83	0,16	0,16	0,16	0,16	0,84	0,16	0

Dördüncü kümede de ele alınan çalışmalar açık döngü tedarik zinciri olarak tasarlanmış olup, çoğunlukla karma tamsayı doğrusal programlamaya göre modellenmiş olup az sayıda da olsa lineer ve karma tamsayı doğrusal olmayan programlama ile modellenmiş ve tamamına yakını kesin yöntemler ile çözümlenmiştir. Bu kümedeki çalışmalara çoğunlukla belirsizliği gidermek için duyarlılık analizi uygulanmıştır.



Şekil 4. 1x4 topolojisine göre elde edilen kümeler için girdilerin ağırlıkları (Weights of inputs for sets obtained according to 1x4 topology)

Şekil 4, girdi vektörünün tüm üyeleri için bir ağırlık düzlemini göstermektedir. Burada küme kompozisyonunda etkisi olmayan değişkenlerin ağırlıklarını temsil eden bağlantılar siyah renkle, yüksek derecede etkisi olan güçlü pozitif bağlantılar ise kırmızı renkle gösterilmiştir. Bu görsel bize her bir kümenin bu şekilde oluşmasında hangi değişkenin ne kadar öneme sahip olduğu hakkında fikir vermektedir.

#### 4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

##### 4.1. Sonuçlar (Results)

Birinci kümeyi diğer kümelerden ayıran en belirgin özelliği tüm çalışmaların tek amaçlı olarak modellenmesi ve kesin yöntemlerle çözülmesidir. Çalışmalarda kesin yöntemlerin yanında iki aşamalı olarak hem kesin hem de sezgisel yöntemlerle çözümlenmeler de yapılmıştır (Bai vd., 2016). Çalışmalarda ayrıca belirsizlikler altında aralıklı doğrusal programlama ile açık döngü bir tedarik zinciri modellenmiş ve tek amaçlı olarak modellenmiş, belirsizliği gidermek için yaşam döngüsü analizleri gerçekleştirilmiştir (Ren vd., 2015).

Çalışmalar genellikle karma tamsayılı doğrusal programlama ile modellenmiş bunun yanı sıra doğrusal programlama (Babazadeh, 2017), (Ren vd., 2015), (Azadeh vd., 2014) ve doğrusal olmayan programlama (Mohseni ve Pishvae, 2016), (Cáceres vd., 2015) ile modellemeler de yapılmıştır.

İkinci kümede ele alınan çalışmaların tamamı lineer olmayan programlama ile modellenmiş olup, tüm çalışmalarda belirsizliği gidermek için senaryo analizlerine yer verilmiştir. İncelenen çalışmalarda çok amaçlı (Rincón vd., 2015) ve tek amaçlı çalışmalara (Avami, 2012), (Najmi vd., 2016) yer verilmiştir.

Üçüncü kümede yer alan çalışma açık döngü tedarik zinciri olarak tasarlanarak, karma tamsayılı doğrusal olmayan programlamaya göre modellenmiştir. Bu kümedeki çalışmayı diğer kümelerden ayıran özelliği ise modelin çözümünde sezgisel yöntemlerin kullanılmasıdır.

Dördüncü kümede yer alan çalışmalarda görülen en belirgin ortak özellik tamamına yakınının çok amaçlı olarak tasarlanması ve büyük çoğunluğunda duyarlılık analizleri uygulanmasıdır. Bunun yanında (Azadeh vd., 2014) İran'da yaptığı çalışmalarında belirsizlikleri gidermek için duyarlılık, senaryo ve stokastik analizleri yapılmıştır. Kümedeki çalışmalarda benzer olarak (Yılmaz Balaman ve Selim, 2016) Türkiye'de yaptıkları çalışmada belirsizlikleri gidermek için duyarlılık analizi ve bulanık optimizasyon metotlarıyla birden fazla yöntem kullanmışlardır. Kümedeki çalışmaların neredeyse tamamı kesin çözümlerle çözülmüştür. Kümede bulunan diğer bir çalışma (Jiang ve Zhang, 2016) Çin'de yaptıkları çalışmadır ve genetik algoritma kullanarak sezgisel bir yöntemle çözümlenmiştir.

Nüfus artışına ve gelişen sanayiye bağlı olarak artan enerji ihtiyacının, fosil kaynaklı yakıtlar ile karşılanması nedeniyle oluşan çevresel etkiler son zamanlarda daha çok gündeme gelmiş olup, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır. Enerjinin büyük çoğunluğunun araç yakıtlarında kullanıldığının bilinmesi alternatif yakıt

arayışını arttırmış olup; çalışmaların odağına çevreye duyarlı olması açısından da çok önemli olan biyoyakıtları almıştır. Bu çalışmada yeşil ve yenilenebilir enerji kaynağı olan biyoyakıtlar için tedarik zinciri ağ tasarımı konusu ile ilgili yapılmış çalışmalar ele alınmıştır. Ele alınan 28 bilimsel araştırma 2011-2016 yılları arasında yapılmış olup; ağ yapısı, model, amaç fonksiyonu, belirsizliği ele alış yöntemleri ve kullanılan çözüm yöntemleri açısından değerlendirilmiş ve kümeleme çalışması yapılmıştır.

Öz düzenleyici haritalar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen gruplandırma işlemi ile şimdiye kadar biyoyakıtlar için gerçekleştirilmiş tedarik zinciri ağ tasarımı çalışmalarının yoğunlukları açıkça gösterilmiştir. Kümeleme çalışmasında ortaya çıkan en önemli yorum biyoyakıt tedarik zinciri problemlerinin genellikle açık döngüsel tedarik zinciri olması ve maliyet minimizasyonunu hedeflemesidir. İncelenen çalışmaların büyük çoğunluğunda tek amaç belirlenip bazısında çevresel amaçlar ve sosyal amaçlar da ele alınmıştır.

Kümelemeler yapılırken ağ tasarımı olarak açık döngüsel tedarik zinciri; model olarak doğrusal, doğrusal olmayan, karma tamsayılı doğrusal ve karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modelleri; amaç fonksiyonu olarak tek amaçlı model ve çok amaçlı model; belirsizlikleri giderecek yöntemler için duyarlılık analizi, senaryo, simülasyon, stokastik ve bulanık; çözüm yöntemi olarak ise kesin (exact), sezgisel ve yarı-sezgisel yöntemler ele alınmıştır. Model olarak en fazla karma tamsayılı doğrusal programlama uygulamarın kullanıldığı, doğrusal olmayan karma tamsayılı programlama ile ilgili ise çok az çalışma yapıldığı çalışma sonucunda açıkça görülmüştür. Ayrıca lineer ve lineer olmayan programlamanın kullanıldığı çalışmalar da yapılmıştır. Ele alınan çalışmaların büyük çoğunluğu tek amaçlı olarak modellenmiş olup nispeten az sayıda çok amaçlı modeller de kullanılmıştır. Belirsizliklerin giderilmesinde ise çoğunlukta duyarlılık analizi kullanılırken, senaryo analizleri ikinci en çok kullanılan yöntemdir. Ayrıca modellerde belirsizliklerin giderilmesi için simülasyon analizi, stokastik optimizasyon ve bulanık optimizasyon çalışmalarına da yer verilmiştir.

Çözüm yöntemlerinde ise kesin yöntemler sıklıkla kullanılmış, sezgisel yöntemler yok denilecek kadar az tercih edilmiştir.

### **Teşekkür (Acknowledgement)**

Bu çalışma 14-2017/19 karar no ile onaylanan 'Biyodizel Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı' projesi ile İstanbul Ticaret Üniversitesi tarafından desteklenmektedir.

### **Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)**

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

### **Kaynaklar (References)**

- Andersen, F., Iturmendi, F., Espinosa, S., Diaz, M.S., 2012. Optimal Design and Planning of Biodiesel Supply Chain with Land Competition. *Computers & Chemical Engineering*, 47, 170-182. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2012.06.044.
- Avami, A., 2012. A Model for Biodiesel Supply Chain: A Case Study in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4196-4203. DOI: 10.1016/j.rser.2012.03.023.
- Ayvaz, B., Kuşakçı, A. O., Öztürk, F., Sırakaya, M., (2018a). Biyodizel Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı İçin Çok Amaçlı Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama Modeli Önerisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(4), 55-70.
- Ayvaz, B., Kuşakçı, A. O., Öztürk, F., Karakoç, E., (2018b). Biyodizel Yakıtlar İçin Çok Dönemli Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı: Türkiye Örneği. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6 (4), 862-876. DOI: 10.29109/gujsc.411873
- Azadeh, A., Arani, H. V., 2016. Biodiesel Supply Chain Optimization Via a Hybrid System Dynamics-Mathematical Programming Approach. *Renewable Energy*, 93, 383-403. DOI: 10.1016/j.renene.2016.02.070
- Azadeh, A., Arani, H. V., Dashti, H., 2014. A Stochastic Programming Approach Towards Optimization of Biofuel Supply Chain. *Energy*, 76, 513-525. DOI: 10.1016/j.energy.2014.08.048.
- Azar, A. T., El-Said, S. A., Hassanien, A. E., 2013. Fuzzy and Hard Clustering Analysis for Thyroid Disease. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 111(1), 1-16, DOI: 10.1016/j.cmpb.2013.01.002.
- Babazadeh, R., 2017. Optimal Design and Planning of Biodiesel Supply Chain Considering Nonedible Feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1089-1100. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.088.
- Babazadeh, R., Razmi, J., Pishvae, M.S., Rabbani, M., 2017. A Sustainable Second Generation Biodiesel Supply Chain Network Design Problem Under Risk. *Omega*, 66(B), 258-277, DOI: 10.1016/j.omega.2015.12.010.
- Babazadeh, R., Razmi, J., Rabbani, M., Pishvae, M. S., 2015. An Integrated Data Envelopment Analysis Mathematical Programming Approach to Strategic Biodiesel Supply Chain Network Design Problem. *Journal of Cleaner Production*, 147, 694-707. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.038.
- Bai, Y., Ouyang, Y., ShiPang, J., 2016. Enhanced Models and Improved Solution for Competitive Biofuel Supply Chain Design Under Land Use Constraints. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 281-297. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.08.027.

- Cáceres, R. G. G., Avella, M. E.M., Gómez, F. P., 2015. Tactical Optimization of the Oil Palm Agribusiness Supply Chain. *Applied Mathematical Modelling*, 39(20), 6375-6395. DOI:10.1016/j.apm.2015.01.031.
- Cavazos, T., 2000. Using Self-Organizing Maps to Investigate Extreme Climate Events: An Application to Wintertime Precipitation in the Balkans. *Journal of Climate*, 13(10), 1718-1732. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<1718:USOMTI>2.0.CO;2.
- Duarte, A., Sarache, W., Costa, Y., 2016. Biofuel Supply Chain Design From Coffee Cut Stem Under Environmental Analysis. *Energy*, 100(C), 321-331. DOI: 10.1016/j.energy.2016.01.076.
- Ennis, D., Medaille, A., Lambert, T., Kelley, R., Harris, F. C., 2013. A Comparison of Academic Libraries: An Analysis Using a Self-Organizing Map, *Performance Measurement and Metrics*, Vol. 14(2), 118-131. DOI: 10.1108/PMM-07-2012-0026.
- Ercan, S., Kayakutlu, G. 2015. Scheduling in Energy Systems. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences-Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 33, 679-690.
- Gonela, V., Zhang, J., Osman, A., Onyeaghala, R., 2015. Stochastic Optimization of Sustainable Hybrid Generation Bioethanol Supply Chains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 77,1 -28. DOI: 10.1016/j.tre.2015.02.008.
- Haykin, S. S. 2009. *Neural networks and learning machines*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, New Jersey.
- Hombach, L. E., Cambero, C., Sowlati, T., Walther, G., 2016. Optimal Design of Supply Chains for Second Generation Biofuels Incorporating European Biofuel Regulations. *Journal of Cleaner Production*, 133(1), 565-575. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.107.
- Höppner, F., 2002. Speeding Up Fuzzy C-Means: Using A Hierarchical Data Organisation to Control the Precision of Membership Calculation. *Fuzzy Sets and Systems*, 128(3), 365-376. DOI: 10.1016/S0165-0114(01)00204-4.
- Ivanov, B., Stoyanov, S., 2016. A mathematical model formulation for the design of an integrated biodiesel-petroleum diesel blends system. *Energy*, 99, 221-236. DOI: 10.1016/j.energy.2016.01.038.
- Jiang, Y., Zhang, Y., 2016. Supply Chain Optimization of Biodiesel Produced from Waste Cooking Oil. *Transportation Research Procedia*, 12, 938-949. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.02.045.
- Kalteh, A.M., Hjorth, P., Berndtsson, R., 2008. Review of The Self-Organizing Map (SOM) Approach in Water Resources: Analysis, Modelling and Application. *Environmental Modelling & Software*, 23(7), 835-845. DOI: 10.1016/j.envsoft.2007.10.001.
- Kaufman, L., Rousseeuw, P. J., 1990. *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. Wiley Publication. New York.
- Kohonen, T., 1982. Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps. *Biological Cybernetics*, 43(1), 59-69. DOI: doi.org/10.1007/BF00337288.
- Kuşakçı, A., Ayvaz, B., Öztürk, F., Sofu, F. (2019) Bulanık MULTIMOORA ile Personel Seçimi: Havacılık Sektöründe Bir Uygulama. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 96-110. DOI: 10.28948/ngumuh.516835
- Lämsiluoto, A., Eklund, T., Back, B., Vanharanta, H., Visa, A., 2004. Industry-Specific Cycles and Companies' Financial Performance Comparison Using Self-Organizing Maps, *Benchmarking: An International Journal*, 11(3), 267-286. DOI: 10.1007/BF00337288.
- Leão, R.R.C.C., Hamacher, S., Oliveira, F., 2011. Optimization of Biodiesel Supply Chains Based On Small Farmers: A Case Study in Brazil. *Bioresour Technol*, 102(19), 8958-8963. DOI:10.1016/j.biortech.2011.07.002.
- Li, Q., Hu, G., 2014. Supply Chain Design Under Uncertainty for Advanced Biofuel Production Based On Bio-Oil Gasification. *Energy*, 74(1), 576-584. DOI: 10.1016/j.energy.2014.07.023.
- Liu, Z., Qiu, T., Chen, B., 2014. A study of the LCA based biofuel supply chain multi-objective optimization model with multi-conversion paths in China. *Applied Energy*, 126(C), 221-234 DOI:10.1016/j.apenergy.2014.04.001.
- MacQueen, J., 1967. Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations. *Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1, 281-297.
- Marufuzzaman, M., Eksioğlu, S. D., Huang, Y. E., 2014. Two-Stage Stochastic Programming Supply Chain Model for Biodiesel Production Via Wastewater Treatment. *Computers & Operations Research*, 49, 1-17. DOI: 10.1016/j.cor.2014.03.010.
- Meyer, A., Cattrysse, D., Orshoven, J.V., 2015. A Generic Mathematical Model to Optimise Strategic and Tactical Decisions in Biomass-Based Supply Chains(OPTIMASS). *European Journal of Operational Research*, 245(1), 247-264. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.02.045.
- Mohseni, S., Pishvae, M. S., 2016. A Robust Programming Approach Towards Design and Optimization of Microalgae-Based Biofuel Supply Chain. *Computers & Industrial Engineering*, 100, 58-71. DOI: 10.1016/j.cie.2016.08.003.
- Mohseni, S., Pishvae, M.S., Sahebi, H., 2016. Robust Design and Planning of Microalgae Biomass-To-Biodiesel Supply Chain: A Case Study in Iran. *Energy*, 111(C), 736-755. DOI: 10.1016/j.energy.2016.06.025.
- Moncada, J.A., Lukszo, Z., Junginger, M., Faaij, A., Weijnen, M., 2017. A Conceptual Framework for The Analysis of The Effect Of Institutions On Biofuel Supply Chains. *Applied Energy*, 185(1), 895-915. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.070.
- Mostafa, M. M., 2009. Shades of green: A Psychographic Segmentation of the Green Consumer in Kuwait Using Self-Organizing Maps. *Expert Systems with Applications*, 36(8), 11030-11038. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.02.088.
- Najmi, A., Shakouri, G. H., Nazari, S., 2016. An Integrated Supply Chain: A Large Scale Complementarity Model for the Biofuel Markets. *Biomass and Bioenergy*, 86, 88-104. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.01.010.
- Oğuzlar A., 2005. Kümeleme Analizinde Yeni Bir Yaklaşım: Kendini Düzenleyen Haritalar (Kohonen Ağları). *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 19 (2), 93-107.
- Özçalıcı, M., 2016. Clustering Stocks with Self-Organizing Maps: An Application On Stocks Listed in BIST50 Index. *Istanbul University Journal of the School of Business*, 45(1), 22-33.
- Ozturk, F., Kaya, G. K. (2020). Personnel selection with fuzzy VIKOR: an application in automotive supply industry. *Gazi University Science Journal: Part C Design and Technology*, 8(1), ss. 94-108. DOI: 10.29109/gujsc.595288
- Pasandideh, S.H. R., Niaki, S. T. A., Asadi, K., 2015. Bi-Objective Optimization of a Multi-Product Multi-Period Three-Echelon Supply Chain Problem Under Uncertain Environments: NSGA-II and NREGA. *Information Sciences*, 292, 57-74. DOI: 10.1016/j.ins.2014.08.068.

- Ren, J., Dong, L., Sun, L., Goodsite, M. E., Tan, S., Dong, L., 2015. Life Cycle Cost Optimization of Biofuel Supply Chains Under Uncertainties Based on Interval Linear Programming. *Bioresource Technology*, 187, 6-13. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.03.083.
- Rincón, L. E., Valencia, M. J., Hernández, V., Matallana, L. G., Cardona, C. A., 2015. Optimization of The Colombian Biodiesel Supply Chain from Oil Palm Crop Based On Techno-Economical and Environmental Criteria. *Energy Economics*, 47, 154-167. DOI: 10.1016/j.eneco.2014.10.018.
- Schwardt, M., Dethloff, J., 2005. Solving A Continuous Location-Routing Problem by Use of a Self-Organizing Map. *Int J. Physical Distribution & Logistics Management* 35(6), 390-408. DOI: 10.1108/09600030510611639.
- Yılmaz Balaman Ş., Selim, H., (2016). Sustainable Design of Renewable Energy Supply Chains Integrated with District Heating Systems: A Fuzzy Optimization Approach. *Journal of Cleaner Production*, 133, 863-885. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.001
- Zhang, F., Johnson, D., Johnson, M., Watkins, D., Froese, R., Wang J., 2016. Decision support system integrating GIS with simulation and optimisation for a biofuel supply chain. *Renewable Energy*, 85, 740-748. DOI: 10.1016/j.renene.2015.07.041.



## A NEW IMPERCEPTIBLE STEGANOGRAPHY METHOD FOR GRAYSCALE IMAGES

Hüseyin Bilal MACİT<sup>1\*</sup>, Arif KOYUN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mehmet Akif Ersoy University, Bucak Z.T. School of Applied Technology and Business, Department of IT Systems and Technologies, Burdur, Turkey

<sup>2</sup> Suleyman Demirel University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Isparta, Türkiye

### Keywords

*Steganography, LSB, Data Hiding, Image Steganography, Block Based Steganography, SSIM.*

### Abstract

A standard Least Significant Bit (LSB) algorithm changes average 50% of the least significant bits of an image. This causes approximately a 0.2% distortion on a grayscale image. Therefore, the application of LSB on non-sharp grayscale images causes too much noise that can be easily detected by the human visual system. In addition; when the image is scanned pixel by pixel, hidden message can be easily read by unauthorized persons. A robust and imperceptible block-based LSB steganography method is developed in this study. First, cover image is divided into blocks, then median geometric mean and arithmetic mean of each block is calculated to select blocks those contain less detail of the image. Method has an advantage of calculating data load capacity of image before embedding process. Proposed method also makes it difficult for unauthorized people to detect hidden messages. Performance of the method is measured by mathematical methods such as MSE, PSNR and SSIM. The method achieved structured similarity score over 0.9999% on four test images, indicating a 20-fold better result than the standard LSB algorithm.

## GRİ TONLAMALI GÖRÜNTÜLER İÇİN YENİ BİR ALGILANAMAZ STEGANOGRAFI YÖNTEMİ

### Anahtar Kelimeler

*Steganografi, EÖB, Veri Gizleme, Görüntü Steganografi, Blok Tabanlı Steganografi, SSIM.*

### Öz

Standart bir En Önemsiz Bit (EÖB) algoritması, bir görüntünün en az önemli bitlerinin ortalama %50' sini değiştirir. Bu durum gri tonlamalı bir görüntüde yaklaşık olarak %0,2 bozulmaya neden olur. Bu nedenle, keskin olmayan gri tonlamalı görüntülerde EÖB uygulaması, insan görsel sistemi tarafından kolayca tespit edilebilecek çok fazla gürültüye neden olur. Ek olarak; görüntü piksel piksel tarandığında, gizli mesaj yetkisiz kişilerce kolayca okunabilir. Bu çalışmada sağlam ve algılanamayan blok tabanlı EÖB steganografi yöntemi geliştirilmiştir. İlk önce kapak resmi bloklara bölünür, sonra görüntünün daha az ayrıntılarını içeren blokları tespit etmek için her bir bloğun medyan geometrik ortalaması ve aritmetik ortalaması hesaplanır. Yöntemin, veri gizleme işleminden önce görüntünün veri yükü kapasitesini hesaplayabilme avantajı vardır. Geliştirilen yöntem ayrıca yetkisiz kişilerin gizli mesajları tespit etmelerini zorlaştırır. Yöntemin performansı MSE, PSNR ve SSIM gibi matematiksel yöntemlerle ölçülmüştür. Yöntem, dört test görüntüsünde %0,9999' un üzerinde yapısal benzerlik skoru elde etmiştir ve standart EÖB algoritmasından 20 kat daha iyi sonuç alındığı gösterilmiştir.

### Alıntı / Cite

Macit, H.B., Koyun, A., (2020). A New Imperceptible Steganography Method for Grayscale Images, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(2), 357-365.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H.B. Macit, 0000-0002-5325-5416  
A. Koyun, 0000-0001-6701-363X

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	08.03.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	18.12.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	02.06.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: hbmacit@mehmetakif.edu.tr, +90-248-491-2450

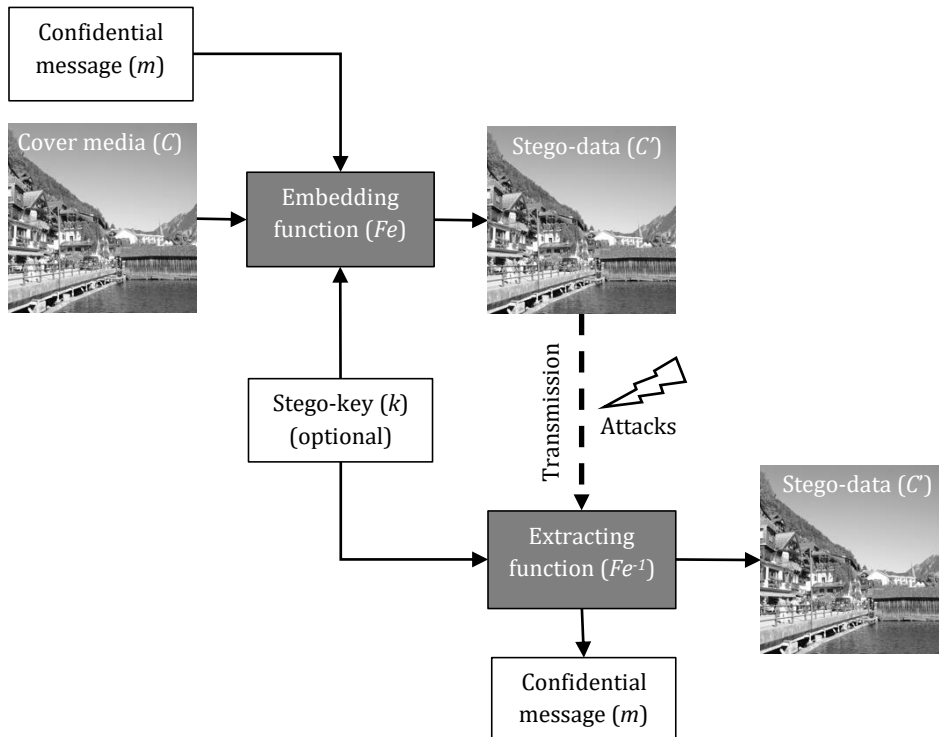
## 1. Introduction

Data hiding methods, which date back to ancient times, appear in different forms in the 21st century digital environment (Yalman and Ertürk, 2009). The concept of 'What you see is what you get' is now not completely true with the growing digital World even an ordinary data could be perceived as a suspicious data (Cheddad et al., 2010). One of the methods of data hiding is steganography which is hiding a message in a cover media so as not to be noticed. In simple terms, steganography means "storing one data into another".

The name Steganography was put by Johannes Trithemus who lived between years 1462 and 1516. The word "Steganographia" is composed of Greek words "στεγανό-ς" which means secret and "γραφ-ειν" which means writing (Por and Delina, 2008). Steganography shows similarity with cryptography. Both deal with the security of the data. Steganography and cryptology create an effective data-hiding method when used together. However, the most important difference between steganography and cryptography is the doubt factor (Brainos, 2004). All data in cryptography are encrypted and clear. But in steganography, all ordinary data passing through the communication line may be suspicious.

The most common use of steganography has been in the military field. One of the best known examples is a message carried by a Nazi spy in World War II. The message is: "Apparently neutral's protest is thoroughly discounted and ignored. Isman hard hit. Blockade issue affects pretext for embargo on by-products, ejecting suets and vegetable oils". When the second letters of the words in this insignificant like message are written side by side, the secret message appears: "Pershing sails from NY June 1" (Johnson and Jajodia, 1998). Here, a hidden text is sent by hiding in another text which is called the cover media. Cover media and hidden messages can be a text, picture, sound, video or another data packet (Chandramouli and Memon, 2001).

Large distortions can be made to a digital media to hide other information into it. However, the major changes in the original media will be noticeable by the human visual system (HVS) or the human auditory system (HAS). HAS is more sensitive to detect small changes in objects than the HVS. For example; HAS is able to detect small changes in audio frequencies below 2 kHz. However, this does not apply to the HVS. Thus, the secure data hiding method used to protect an audio data may not be applicable to an image data. It is inevitable to use different methods for different types of media (Chore and Tiwari, 2017).



**Figure 1.** A standart steganographic operation model

A typical steganographic operation is performed in figure 1. As it is seen in figure 1, hidden message  $m$  is embedded in the cover media  $C$  using an embedding function  $Fe$  in a steganography method. Here, the stego-key  $k$  may represent a crypto-key or it may be a set of information that stores how the message is hidden or going to hide.

Every steganography method does not have to use the Stego-key. However, if stego-key is used in the embedding phase, the extracting function  $Fe^{-1}$  cannot extract the secret message  $m$  without this key.

The performance of a steganographic system can be evaluated on various features. The most important of these is imperceptibility. Imperceptibility expresses how well the hidden data is camouflaged. Another measure is the steganographic data load. Data load refers to quantity of data which can be embedded in the cover data. As the hidden data size decreases and the cover data size increases, the success of the steganographic method will also increase. Studies on steganography have focused on the development of algorithms that generally embed larger sized hidden data within smaller sized cover data successfully. Furthermore, as the number of data transferred in a transmission medium increases, the possibility of stego data detection will decrease in the same proportion (Eggers et al., 2002). Other performance criteria is robustness which refers to the resistance of stego-data to attacks by unauthorized persons (Şatır, 2013). These three features are expressed in a triangle which is called the magic triangle shown in figure 2. As it is seen, if a method gets closer to one feature, it gets farther to other features. Hence, recommendation of the method must be clearly preferred.

If the detectability of confidential data is zero, it can be said that this steganography method is perfectly safe. Any image steganography method should be optimized to achieve the minimum detectability possible, taking into account the data load. (Yu et al., 2005).

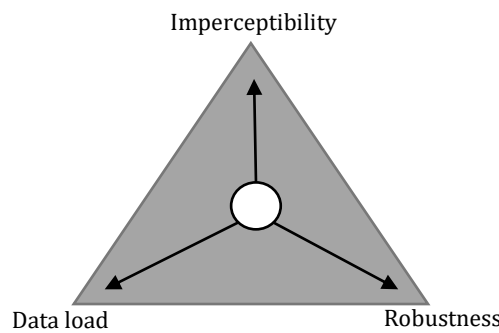


Figure 2. Magic triangle of data hiding (Hamza, 2008).

An image file is actually a matrix of pixels. Each pixel can be expressed mathematically (Hamid et al., 2012). Image steganography methods are examined in two categories as spatial domain and transform domain methods. A spatial domain method embeds the confidential message in the pixel space. The transform domain methods embed the confidential message in the frequency domain. This study proposes a new image steganography method using the LSB technique, which is the most common method of spatial domain methods. The proposed method is designed for grayscale images and tested for performance.

## 2. Methodology

The standard LSB algorithm is a form of image processing, like signal processing. The input data of this study is an image and the output data is the hidden message generated from the image data. The image is treated as a matrix of pixels. Each element of the matrix refers to a pixel of the image.

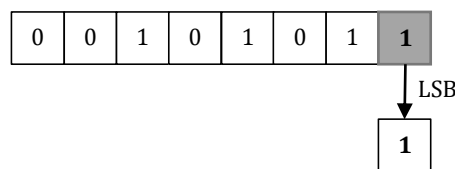


Figure 3. LSB value of an example pixel which is 43 in decimal (Luo et al., 2010).

In a grayscale image, each pixel is encoded with 8 bits which is equal to 1 byte as it is shown in figure 3. Pixels encoded with 1 byte each have a decimal value of 0 to 255. LSB algorithm changes the LSB bit of next pixel with next bit of the confidential message. This operation makes a change in the pixel value with a small ratio.

Let  $C$  is a grayscale cover media composed of  $C_1 \times C_2$  pixels.  $C$  is represented as in equation (1).

$$C = \{x_{ij} | 0 \leq i < C_1, 0 \leq j < C_2, x_{ij} \in \{0,1,2, \dots, 255\}\} \quad (1)$$

$m$  is the confidential message composed of  $n$  bits in equation (2).



$$m = \{m_i | 0 \leq i < n\} \quad m_i \in \{0,1\} \tag{2}$$

Suppose that  $n$  bits confidential message  $m$  is going to embed in  $k$  LSB bits of  $C$ . First,  $m$  must be denoted as  $m'$  which is composed of  $k$  bits as in equation (3) and equation (4).

$$m' = \{m'_i | 0 \leq i < n'\} \tag{3}$$

$$m'_i \in \{0,1,2, \dots, 2^k - 1\} \quad n' < m_c \times m_c \tag{4}$$

Mapping  $n$  bits of confidential message  $m=\{m_i\}$  and hidden message  $m'=\{m'_i\}$  is shown in equation (5).

$$m'_i = \sum_{j=0}^{k-1} m_{i,k+j} \cdot 2^{k-1-j} \tag{5}$$

$n'$  pixels  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  are selected from cover image  $C$ .  $k$  LSB  $x_i$  of this sequence swaps with  $m'_i$ . Swapped  $x_i$  is expressed as  $x'_i$  derived from  $m'_i$  as in equation (6).

$$x'_i = x_i - x_i \bmod 2^k + m'_i \tag{6}$$

To extract hidden message, the sequence  $\{x'_1, x'_2, \dots, x'_n\}$  of stego image in embedding process is followed. Equation (7) calculates an  $m'$  sequence which is created by  $k$  LSB bits.

$$m'_i = x'_i \bmod 2^k \tag{7}$$

Here, theoretically, the worst imperceptibility is obtained during embedding when all LSB series  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  are modified. Assuming that the entire series have not changed, the best imperceptibility is achieved. However, this possibility is not calculated in the standard LSB algorithm before embedding process.

### 3. Proposed Method

The LSB algorithm attempts to hide the message by scanning the entire image at once. The major difference of the proposed method is; it pre-calculates the distortion in the cover data to minimize the detectability of existence of the hidden message.  $C$  is a grayscale cover image composed of  $C_1 \times C_2$  pixels and is calculated with equation (8).

$$C = \{x_{ij} | 0 \leq i < C_1, 0 \leq j < C_2\} \tag{8}$$

$$x_{ij} \in \{0,1,2, \dots, 255\}$$

For the embedding process, proposed method divides cover image  $C$  into  $32 \times 32$  equal sized blocks  $B(i,j)$  as it is shown in figure 4. The pseudo code of this process is as follows:

```

for i=1 → C1-((C1/32)-1) step C1/32
  for j=1 → C2-((C2/32)-1) step C2/32
    B(i,j)=C(i:i+((C1/32)-1),j:j+((C2/32)-1))
    
```

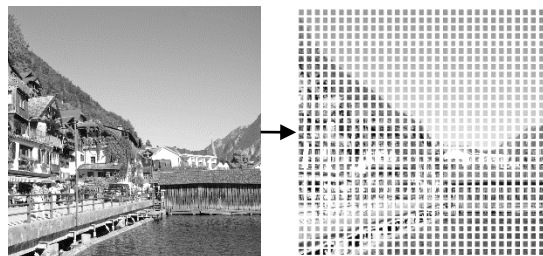


Figure 4. Cover image divided into 32x32 blocks

Method generates a copy of each original image blocks  $B(i,j)$  to new blocks  $B'(i,j)$  to calculate optimum data load before hiding the message. Then the mean of each block of the original image is stored in a  $O$  matrix which is in size of  $32 \times 32$  cells as in equation (9).

$$O_{(i,j)} = \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} B_{(i,j)} \tag{9}$$

For effective steganography that cannot be detected by HVS, blocks containing least image detail should be selected. For this purpose, blocks  $O'(i, j)$  are generated from  $O(i, j)$  blocks using geometric median filtering as in equation (10).

$$O'(i,j) = \frac{1}{\mu - \varphi} \sum r(i,j) \tag{10}$$

In equation (10),  $r(i,j)$  represents remaining pixels after subtracting the lowest and highest  $\varphi/2$  pixel value each step.

$$\varphi = \frac{\mu - 1}{2} \tag{11}$$

$$0 \leq \varphi \leq \mu - 1$$

Equation (11) calculates median mean of the block. Now; generated  $O(i,j)$  and  $O'(i,j)$  points out each block of cover image  $C$ . To select the blocks carrying minimum detail of image; the absolute value of the difference between the matrixes  $O$  and  $O'$  is calculated and stored into the  $F$  matrix in equation (12).

$$F(i,j) = |O(i,j) - O'(i,j)| \tag{12}$$

The  $F$  matrix briefly shows the difference of the median mean and arithmetic mean of each block. Equation (13) calculates the arithmetic mean  $\delta$  of the  $F$  matrix which is the average difference of the median mean and arithmetic mean of the cover image  $C$  and generated image  $C'$ .

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} F(i,j)}{32 \times 32} \tag{13}$$

$\delta$  shows the difference of  $O$  and  $O'$  blocks and it also shows the blocks which are selected to embed the message to gain imperceptibility. Change of LSBs in selected blocks can't be easily captured by the HVS because these blocks contain minimum details of the cover image as shown in the example in figure 5.

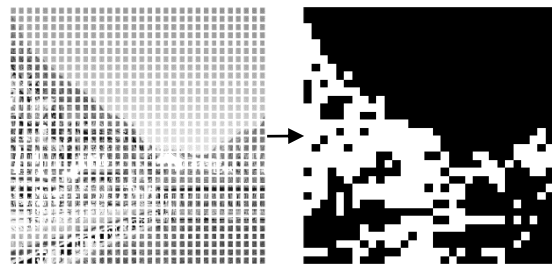


Figure 5. Detection of blocks containing detail below median and arithmetic average

With the UTF-8 character encoding, the number of letters  $u_c$  that can be embedded in each selected block can be calculated by dividing the number of pixel count of selected blocks by 8 per character as in equation (14).

$$u_c(F(i,j)) = \left\{ \frac{C_1 \times C_2}{32 \times 32 \times 8}, F(i,j) > \delta \right\} \tag{14}$$

For example, if the selected block size is 16x16 pixels, 1 bit of each pixel will be used for embedding, so a total of 256 bits (32 bytes) can be embedded in this block. Each character is encoded by 1 byte in a hidden message. So, 32 character message can be embedded in a block sized 16x16 pixels. Once the number of characters  $u_c$  has been calculated, the standard LSB algorithm is applied to the selected block as in equation (15).

$$O'(i,j) = \begin{cases} O(i,j) - 1, & LSB(O(i,j)) = 1, m = 0 \\ O(i,j), & LSB(O(i,j)) = m \\ O(i,j) + 1, & LSB(O(i,j)) = 1, m = 1 \end{cases} \tag{15}$$

Here;  $m$  is the next bit of the secret message (Jain et al., 2012). At last step; stego image is created with the composition of message embedded blocks and original blocks as in figure 6.

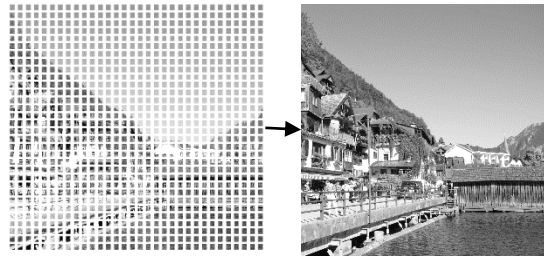


Figure 6. Generated stego image with the composition of 32x32 blocks

Many data-hiding methods use the inverse of embedding algorithm as the extraction algorithm. The standard LSB algorithm scans all the image pixels and adds the LSB of each pixel to a binary array. The resulting sequence is finally converted to a character set and so hidden message is obtained. However, the proposed method embeds the hidden message in some blocks of the image, not the whole image. Therefore, if a standard LSB extraction algorithm is applied to this image, a meaningless bit sequence is obtained. In order to find out which blocks contain the hidden message bits; it is necessary to repeat the operations in equations (8) to (16). After the amount of letters  $u_c$  that can be embedded in each block is calculated, the hidden message in the selected blocks can be extracted as in the equation (18) with the same algorithm.

$$m_{(n)} = \begin{cases} 0, O'_{(i,j)} = 0 \\ 1, O'_{(i,j)} = 1 \end{cases} \quad (16)$$

Here,  $n$  shows the index number of binary sequence which composes hidden message  $m$ .

#### 4. Results

Figure 7 shows four different grayscale images with 1024x1024 pixels resolution which are used to test proposed method.

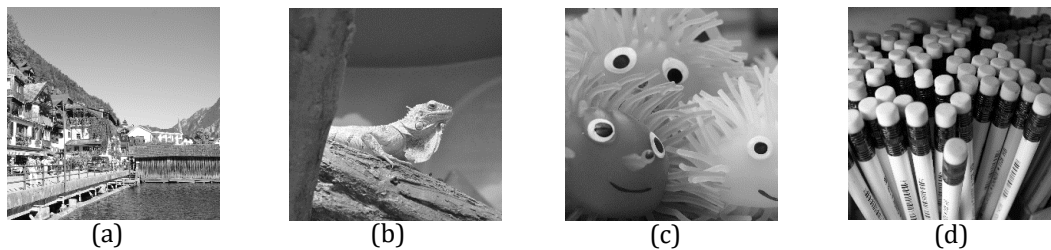


Figure 7. Test images (a) Hallstatt (b) Zoo (c) Toys (d) Pencils

Table 1 shows data load  $u_c$  of these test images which is calculated as in equation (14).

**Table 1.**  $\delta$  ve  $u_c$  of test images

IMAGE	ARITHMETIC MEAN OF F MATRIX $\delta$	DATA LOAD $u_c$
Hallstatt	0.0055	312
Zoo	0.0032	310
Toys	0.0028	575
Pencils	0.0033	422

As it is shown in table 1, the data load  $u_c$  value obtained from the test images varies between 312 and 575 characters. The method does not allow embedding a message longer than calculated  $u_c$  value. So, a 256 characters long message is embedded to these four images to test the method efficiently. Image histograms were taken before and after embedding. Table 2 shows the input and output images of the method with 256 characters embedded message. In the first column of table 2, the blocks selected for embedding message are shown in black color and the blocks with protection are shown in white color.

The performance of a steganography method is measured by the amount of change applied to the cover image. A good steganographic method applies the least possible change in the cover image. An average LSB method is assumed to change half of the last bit of each pixel. In this case, the amount of possible change in the image can be  $1/256$  for each pixel. It is assumed that half of the LSB pixels of image may change and it means a change about

1/512 for the whole image. The greater the amount of change means the less imperceptibility and likely to be detected with HVS. There are some metrics to determine the amount of change on the image. Mean Squared Error (MSE), Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) and Structured Similarity Index (SSIM) are used to evaluate the performance of the proposed method.

MSE is a measurement of signal fidelity. One of the signal is considered as original and the other one is considered as corrupted or processed. The objective of MSE is to compare two signals by providing a quantitative score that defines the level of error or distortion (Chopra et al.,2012). In the proposed method;  $C$  is the original image and  $C'$  is a stego image with  $N$  pixels.

**Table 2.** Application and results of proposed method on test images

BLOCKS $O(i,j)$	ORIGINAL IMAGE $C$	STEGO IMAGE $C'$	ORIGINAL HISTOGRAM	STEGO HISTOGRAM

Signals  $C$  and  $C'$  are supposed as discrete infinite signals.  $x_i$  and  $y_i$  are  $i$ . samples of these signals as in equations (17) and (18).

$$C = \{x_i | i = 1,2,3, \dots, N\} \tag{17}$$

$$C' = \{y_i | i = 1,2,3, \dots, N\} \tag{18}$$

In this case, the MSE value between  $C$  and  $C'$  is calculated with equation (19).

$$MSE(C, C') = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 \tag{19}$$

MSE is transformed to PSNR with equation (20);

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{L^2}{MSE} \tag{20}$$

$L$  is the dynamic range of the allowed image pixel densities. The grayscale images used in the application use 8-bit color value for each pixel. In this case the  $L$  value is calculated in equation (21).

$$L = 2^{bc} - 1 = 2^8 - 1 = 255 \quad (21)$$

Here;  $bc$  is bit count stored per pixel. Visual distortion in the resulting stego image  $C'$  can be measured and analyzed by the corresponding PSNR (Luo et al., 2010). If  $C$  and  $C'$  are equal images, the PSNR value will be infinite. If they are completely different, PSNR value will be 0.

The distribution of pixels is not completely changed during a digital transformation to natural images. This fact is the basic idea for the definition of SSIM. Original  $C$  and modified  $C'$  images are separated into brightness, contrast and structure components. These components are defined as in equations (22), (23) and (24).

$$l(C, C') = \left( \frac{2\mu_C\mu_{C'} + k_1}{\mu_C^2 + \mu_{C'}^2 + k_1} \right) \quad (22)$$

$$c(C, C') = \left( \frac{2\sigma_C\sigma_{C'} + k_2}{\sigma_C^2 + \sigma_{C'}^2 + k_2} \right) \quad (23)$$

$$s(C, C') = \left( \frac{2\sigma_{CC'} + k_3}{\sigma_C + \sigma_{C'} + k_3} \right) \quad (24)$$

After calculating  $l, c$  and  $s$ ; local SSIM is calculated in equation (25).

$$SSIM(C, C') = l(C, C')^\alpha \cdot c(C, C')^\beta \cdot s(C, C')^\gamma \quad (25)$$

In equation (25);  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  are the three parameters used to adjust the importance of each of the three components.  $\mu_C$  and  $\mu_{C'}$  are sampling mean of  $C$  and  $C'$  respectively.  $\sigma_C$  and  $\sigma_{C'}$  are sample standart deviations of  $C$  and  $C'$ .  $\sigma_{CC'}$  is the cross corelation of  $C$  and  $C'$  after subtracting their means.  $k_1, k_2$  and  $k_3$  are small positive constants that stabilize each term. Thus, samples, variances or correlations close to zero do not cause numerical instability. All SSIM measurements between the original and the reference image are calculated by taking the average of the local SSIM values which are taken over the whole image (Swanson et al., 1996). The two images match the same if the SSIM result is 1.

The performance metrics obtained after embedding data to four different test images with developed method are shown in table 3.

**Table 3.** Performance results of proposed method with sample images

IMAGE	MSE	PSNR	SSIM
Hallstatt	0.00097370	78.2465	1.0000
Zoo	0.00095272	78.3411	1.0000
Toys	0.00097370	78.2465	1.0000
Pencils	0.00096130	78.3022	1.0000

MSE is measured to calculate PSNR. But proposed method achieves MSE values below 0.001 which is a successfull value for steganography. The minimum PSNR for unnoticed visual disturbance is 30dB. PSNR with 53 value for 100% embedding (1 bit per 1 pixel) is treated as excellent. Generally for standard algorithms, PSNR value should be 50 and above for 100% embedding. Proposed method achieved PSNR values over 78 with success. SSIM result 1.0000 is related to the SSIM function of the Matlab program which is running with a precision of 1/10000. The developed embedding method has made so little changes in the cover image  $C$ ; thus SSIM is calculated over 0.9999 and Matlab floors the value up to 1. The standard LSB algorithm, as it is mentioned earlier, makes a change of 1/512 in the image, so that the SSIM value is 0.9981 in general. Calculated SSIM value as 1 in all test images shows the efficiency of proposed method. In addition, 32x32 blocks were used in the test method.

## 5. Conclusions

It has seen in the tests that increasing the number of blocks increases the data load of the method. However, it increases the complexity and duration of the process. It also increases the robustness of embedded data. While applying the method, all these effects can be considered and the expected imperceptibility, robustness and

processing speed can be optimized by changing the number of blocks. The method differs from the methods in the literature with the advantage of calculating the data load capacity of the image before data hiding process. It is also very difficult for unauthorized persons to detect hidden data through the human visual system, because the message is not embedded in the whole picture in order as standart LSB methods. In other words, the method hides data into different pixels of each different image.

### Acknowledgement

This work was supported by Scientific Research Fund of the Suleyman Demirel University. Project Number: 4382-D1-15.

### Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

### References

- Brainos, A., 2004. A Study of steganography and the Art of Hiding Information, Security Writer.
- Chandramouli, R., Memon, N., 2001. Analysis of LSB based image steganography techniques, Proceedings of the International Conference on Image Processing, 3(1), 1019 – 1022.
- Cheddad, A. Condell, J., Curran, K., McKeivitt, P., 2010. Digital Image Steganography: Survey and Analysis of Current Methods, Signal Processing, 90(1), 727–752.
- Chopra, D., Gupta, P., Sanjay, G., Gupta, A., 2012. Lsb Based Digital Image Watermarking For Gray Scale Image, IOSR Journal of Computer Engineering, 6(1), 36-41.
- Chore, A.M., Tiwari, N., 2017. Survey on Different Methods of Digital Audio Watermarking, Int. Journal of Engineering Research and Application, 7(6), 113-116.
- Eggers, J.J., Bauml, R., Girod, B., 2002. A Communications Approach to Image Steganography, Proceedings of SPIE, Security and Watermarking of Multimedia Contents IV San Jose, California, USA.
- Hamid, N., Yahya, A., Ahmad, R.B., Al-Qershi, O.M., 2012. Image Steganography Techniques: An Overview, International Journal of Computer Science and Security (IJCSS), 6(1), 3012, 168-187.
- Hamza, Y.A., 2008. Blok Kırpma Kodlamasına ve Ayrık Dalgacık Dönüşümüne Dayalı, Dayanıklı Dijital Renkli Resim Damgalama Sistemi, Anadolu University, Institute of Natural and Applied Sciences, Master Thesis, 92p.
- Jain, N., Meshram, S., Dubey, S., 2012. Image Steganography Using LSB and Edge Detection Technique, International Journal of Soft Computing and Engineering, 2(3), 217-222.
- Johnson, N.F., Jajodia, S., 1998. Exploring Steganography: Seeing the Unseen, IEEE Computer, 26–34.
- Luo, W., Huang, F., Huang, J., 2010. Edge Adaptive Image Steganography Based on LSB Matching Revisited, IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 5(2).
- Por, L.Y., Delina, B., 2008. Information Hiding: A New Approach in Text Steganography, 7th WSEAS Int. Conference on Applied Computer & Applied Computational Science (ACACOS '08), Hangzhou, China.
- Swanson, M.D., Zhu, B., Tewfik, A.H., 1996. Transparent robust image watermarking, International Conference on Image Processing, 3(1), 211-214, Laussane, Switzerland.
- Şatır, E., (2013). Bilgi Güvenliği İçin Metin Steganografisinde Yeni Bir Yaklaşım, Selçuk University, Institute of Natural and Applied Sciences, Master Thesis, 82p.
- Yalman, Y., Ertürk, İ., 2009. Gerçek Zamanlı Video Kayıtlarına Veri Gizleme Uygulaması, XI. Academic Informatics Conference Presentations, Harran University, Şanlıurfa, Turkey, 545-552.
- Yu, Y.H., Chang, C.C., Hu, Y.C., 2005. Hiding secret data in images via predictive coding, Pattern Recognition, 38(1), 691–705.



## SENTIMENT ANALYSIS FROM SOCIAL MEDIA COMMENTS

Özer ÇELİK<sup>1\*</sup>, Usame Ömer OSMANOĞLU<sup>2</sup>, Büşra ÇANAKCI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Eskisehir Osmangazi University, Faculty of Science, Department of Mathematics-Computer, Eskisehir, Turkey

<sup>2</sup> Eskisehir Osmangazi University, Faculty of Medicine, Department of Biostatistics, Eskisehir, Turkey

<sup>3</sup> Eskisehir Osmangazi University, Faculty of Science, Department of Mathematics-Computer, Eskisehir, Turkey

### Keywords

*Sentiment Analysis,  
Machine Learning,  
Social Media,  
Classification Algorithms,  
Data Set.*

### Abstract

Nowadays, many firms and companies are curious about what people think and want and they are working in this direction. For this reason, it is tried to learn the ideas and emotions of people in various ways. However, as it is impossible to process and analyze a large number of emotions and thoughts with human hands, emotion analysis gain more importance. The emotions and thoughts of the people are analyzed and acted according to these requests through the emotion analysis which is quite functional in social networks. The aim of this study is to realize the learning with the data sets obtained from the interpretations made to the social platforms of the determined brands and to transfer the subject of the emotion analysis to the researchers in the best way. The range of accuracy rates reached is wide because of the disadvantages such as not paying attention to the rules of writing on social media or other digital platforms. In our study, a accuracy rate of 70% was achieved. This demonstrates the usefulness of machine learning in interpretation classification and emotion analysis.

## SOSYAL MEDYA YORUMLARINDAN DUYGU ANALİZİ

### Anahtar Kelimeler

*Duygu Analizi,  
Makine Öğrenmesi,  
Sosyal Medya,  
Sınıflandırma Algoritmaları,  
Veri Seti.*

### Öz

Günümüzde birçok firma ve şirket insanların ne düşündüğü ve istediği konusunu merak etmekte ve bu doğrultuda çalışmalar yapmaktadır. Bu nedenle çeşitli yollarla insanların fikirleri ve duyguları öğrenilmeye çalışılmaktadır. Ancak çok sayıda duygu ve düşüncenin insan eliyle işlenip analiz edilmesi imkânsız olduğundan dolayı devreye 'Duygu Analizi' girmektedir. Sosyal ağlarda oldukça işlevsel olan duygu analizi sayesinde insanların duygu ve düşünceleri analiz edilip bu isteklere göre hareket edilmektedir. Bu çalışmanın amacı belirlenen markaların sosyal platformlarına yapılan yorumlardan elde edilen veri setleri ile öğrenmeyi gerçekleştirmek ve araştırmacılara duygu analizi konusunu en iyi şekilde aktarmaktır. Ulaşılan doğruluk oranları, sosyal medyada veya diğer dijital platformlarda yazım kurallarına dikkat edilmemesi gibi dezavantajları nedeniyle geniştir. Çalışmamızda %70'lik bir doğruluk oranı elde edilmiştir. Bu, makine öğrenmenin yorum sınıflandırma ve duygu analizinde kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

### Alıntı / Cite

Celik, O., Osmanoglu, U. O., Canakci, B., (2020). Sentiment Analysis From Social Media Comments, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(2), 366-374.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ö. Çelik, 0000-0002-4409-3101  
U.Ö. Osmanoğlu, 0000-0002-1198-2447  
B. Çanakçı, 0000-0002-9641-0383

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	28.03.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	24.02.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	25.02.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: ozer@ogu.edu.tr, +90-222- 239-3750 / 2234

## 1. Introduction

Due to the widespread use of the Internet, the multiplicity of social networks, the ease of expressing thoughts and thoughts, access to brands, and rapid interaction, people spend most of their time on internet. As a result of this activity on social networks, meaningful and meaningless data are formed. The development of technology and the growth of data, the speed and cost to obtain the data provide the opportunity to work in this field (Baykara et. al., 2017).

Emotional analysis is a research area in which artificial intelligence techniques such as natural language processing, text mining are used to extract subjective information such as opinions, feelings and attitudes within the text. Social networking reviews are a great source of emotion analysis (Aytug & Korukoglu, 2016).

In this study, the comments made to the brands determined via Facebook for the emotion analysis were used as the data set. In addition, accurate estimation rates were compared by using TF-IDF and vector analysis.

TF-IDF (Term Frequency-Reverse Text Frequency):

$$W_{i,d} = tf_{i,d} \times \log(n/df_i) \quad (1)$$

calculates the term of i and text of d. TF is simply defined as the ratio of the term to the most used term.

$$tf_{i,d} = \frac{fr_{i,d}}{df_i} \quad (2)$$

The term frequency in the text d for the term i is the ratio of the term i to the number of repetitions of the term with the highest number of repetitions in the text d.

In this formula, n means the total number of documents, and df the document frequency (the number of how many different documents i term has passed) (Calis et. al., 2013).

### 1.1. n-Gram:

It is the method for finding the repetition rate in a given sequence. n is the value at which the repeat is checked. Gram is used to express the weight of this repeat in the sequence.

1-gram= unigram

2-gram=bigram

3-gram=trigram

These values are specifically named in the literature and values greater than three are generally expressed in n-grams (Cavnar & Trenkle, 1994).

## 2. Literature Survey

Boynukalin (2012) developed a framework with Turkish text for the analysis of emotions and given informations about Weka, Zemberek, Wlir ranking and n-gram approaches. In the study, two types of data sources, the international survey data set and the Turkish tale data set, were used. The first data set was translated into Turkish and the spelling errors were corrected using the zemberek library. Twenty-five tales were used for the other data set and divided because sentence and paragraph level emotion analysis was created. Classification was made as joy-anger-fear-sad. As a result of the study, different classification methods and different weightings were used and the accuracy rates varied between 42% and 85% (Boynukalin, 2012).

Akbas (2012), in her thesis paper, categorized the positive and negative thoughts on Turkish tweets. This classification is composed of 5-point scales. A data set was created in which emotion classification was performed manually (Akbas, 2012).

Garcia et al. (2015), mentioned positive-negative classification and 1 or 5-star classification in their study. Methods include clustering, model sweeping, test error, etc. In the classification, tree classifier, Naive bayesian classifiers and model extraction are mentioned. As a result, they prepared a classifier for positive-negative sentence estimation (Garcia & Yin, 2015).

Akgul et al. (2016) created four separate data sets with tweets made in Turkish according to a specific query word and classified the results as positive-negative and neutral in their study. They have done the Turkish character



conversions by clearing unnecessary characters and words. They used a dictionary and n-gram model in their study and observed a 5% to 10% increase in the three data sets in the dictionary method and scoring. The N-gram study showed an accuracy rate of between 4% and 7% in neutral tweets. As a result, the dictionary and character-based n-gram methods used were approximately 70% and 69% respectively (Akgul et al., 2016).

Kaynar et al. (2016) preferred film interpretations in their study. They created a positive and negative data set consisting of 200 data and performed their experiments using Matlab software. They made researches with classification algorithms and used these researches in their experiments. 75% of the data set was used for the training and the remaining 25% was reserved as test data. As a result, 75% correct classification was performed for SVM and ANN test data sets (Kaynar, 2016).

Gozukara et al. (2016) have made a positive-negative classification of 50 e-commerce sites in their study by using their own data sets. According to normalization n-gram accuracy rate ranged from 84% to 91% by performing TF-IDF experiments (Gozukara, 2016).

Durahim et al. (2018) made music classification. Predefined categories such as music genres and moods were created and 45 Turkish popular artists were selected. For the classification, labeling was carried out if 2 out of 3 persons agreed. The data set was prepared to be 75 songs in each of the four sensory categories. As a result of the trainings, the most successful classification algorithm is Multinomial NB with a success rate of 46% (Durahim et al., 2018).

Baykara et al. (2017) in their study, they mentioned social media analysis, studies on this subject and how to classify data in emotion analysis. In their work, they used PHP language to make emotion analysis and content classification according to the shares about a particular Twitter user. The classification was made by scoring. By scoring positive, negative and neutral word, calculations were done manually (Baykara et al., 2017).

Nalcakan et al. (2015) chose Twitter as the source of their study. The results of emotional analysis were classified as positive, negative and neutral. In the studies, three companies were identified from the technology sector and a separate data set was created for each company. NB, RF, LibSVM, J48 and Kstar classification algorithms were used in the experiments. The training set has been converted to Weka. When all the results were evaluated, it was seen that there were no significant differences between the classification results obtained from the data in the first set of training sets and the results of the education sets which were created by correcting all words by 75% (Nalcakan et al., 2015).

In the study conducted by Yigit, negative/positive percentage, mean negative/positive score, total negative/positive score calculations were made from call center text mining, converting calls from voice call centers to text and positive and negative classification. In the experiment, algorithms such as decision tree, KNN, SVM have been tried. According to the results of the experiment, the most successful classification with 82% accuracy was SVM algorithm (Yigit, 2017).

### 3. Material and Method

All experiments were performed using Jupyter Notebook – Python language. Random Forest, Logistic Regression, Multinomial Naive Bayes, Support Vector classifier algorithms are used on the data set. In order to be used in machine learning, the comments in the data set have been converted to numerical data. CountVectorizer and TF-IDF methods were used for this purpose. The data set was taken from the relevant social media platform by writing code with the Ruby programming language.

#### 3.1. Naive Bayes Classification Algorithm

In the Naive Bayes classification, data is presented to the system at a given rate in the class. The new test data presented to the system with the probabilistic operations performed with the learned data are processed according to the previously obtained probability values and it is tried to determine the category of the test data given. The higher the number of data learned, it can be the more precise to determine the categories of test data. The Naive Bayes classification is a classification technique based on Bayes' Theorem (Andrade et al, 2019).

Bayes' Rule;

$p(x|C_j)$ : Probability of being x of an example from class j

$P(C_j)$ : First probability of class j

$p(x)$ : Probability of being x of any example

$P(C_j|x)$ : Probability of being from a class  $j$  of an  $x$  example (last probability)

$$P(C_j|x) = \frac{p(x|C_j)P(C_j)}{p(x)} = \frac{p(x|C_j)P(C_j)}{\sum_k p(x|C_k)P(C_k)} \quad (3)$$

Naive Bayes Classifier, Each sample found in the  $T$  learning set get defined in  $n$ -dimensional space,  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $m$  is the number of class in the data set,  $C_1, C_2, \dots, C_m$ . In the classification, maximum last probability is sought (the maximal  $P(C_i|X)$ ). Derived from Bayes Theorem,  $P(C_i | X) = (P(X | C_i)P(C_i)) / (P(X))$ . Since the probability of  $P(X)$  is constant for all classes, only the maximum value is searched for the probability of  $P(C_i|X) = P(X|C_i)P(C_i)$ .  $P(C_i|X) = P(X|C_i)P(C_i)$ , if all the features are independent in this simplified expression,  $P(X|C_i)$  can be written as follows:

$$P(X|C_i) = \prod_{k=1}^n P(x_k|C_i) = P(x_1|C_i) \times P(x_2|C_i) \times \dots \times P(x_n|C_i) \quad (4)$$

Thus the complexity of the account is greatly reduced (Kaynar et. al., 2016).

### 3.2. Multinomial Naive Bayes

Naive Bayes classification is one of the first preferred methods in many fields due to its easy adaptation, fast and consistent. Multinomial Naive Bayes can examine the model distribution of the words as multicategorical (Ardil, 2009). The purpose of the multi-term model is to determine the frequency of the terms in the text. This method comes to the fore as the importance of the words in the classification of the text is high. The frequency of use of the word in the text also allows testing whether there is any effect on the classification of the text.

### 3.3. Random Forest Classification Algorithm

It is an algorithm that aims to increase the classification value by producing more than one decision tree for classification. It is a combination of many tree decisions that are trained in different training clusters for each tree (Aksu & Karaman, 2017).

$$Gini(T) = 1 - \sum_{j=1}^n (p_j)^2 \quad (5)$$

$T$ : All data set

$P_j$ : The square of division of the number of object smaller and greater than itself of each data in the data set

$n$ : Selected data

After the Gini index is determined, the test data set classes are determined according to the gini index.

### 3.4. Support Vector Machines

Support vector machines is the classification algorithm based on statistical learning theories Support vector machines originally designed for the classification of two-class linear data are then generalized to the classification of multi-class and non-linear data. The principle of operation is to estimate the optimal decision function that can distinguish between two classes (Pham et al, 2019).

#### 3.4.1. For Linear Separable Data

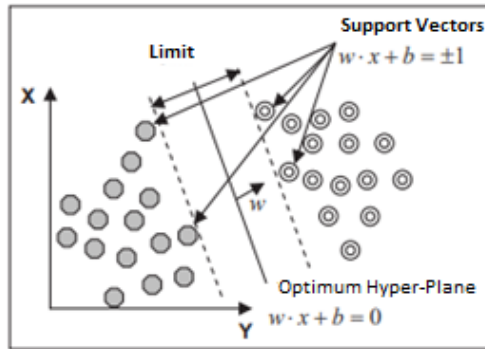
In the support vector machines classification, it is aimed to separate the samples belonging to the two classes, which are usually represented by the class labels  $\{1, +1\}$ , by means of a decision function obtained by the training data. By using the decision function, there is a hyper plane which can best distinguish the training data.

In the case of a linear classification of two classes of classification problems, the inequalities of the optimal hyperplane are as follows if it is assumed that the training data consisting of a number of samples for training of the support vector machines is  $x_i, y_i, i = 1, \dots, k$ ;

$$w \cdot x_i + b \geq +1 \quad \text{for each } y = +1 \quad (6)$$

$$w \cdot x_i + b \leq -1 \quad \text{for each } y = -1 \quad (7)$$

Here;  $x \in \mathbb{R}^N$  shows an N-dimensional space,  $y \in \{-1, +1\}$  shows class labels,  $w$  shows weight vector (normal of hyper plane) and  $b$  shows trend value. In order to determine the optimal hyperplane, two hyperplane should be determined which will form parallel and boundary to this plane (Figure 1). The points forming this hyper plane are called support vectors.



**Figure 1.** Determination of the hyperplane for linearly separable data sets (García-Gonzalo et al, 2016)

By minimizing  $\|w\|$  the optimum hyperplane limit maximizes. In this case, the solution of the limited optimization problem is required to solve the optimal hyperspace.

$\min[\frac{1}{2} \|w\|^2]$  Limitations related to this are;

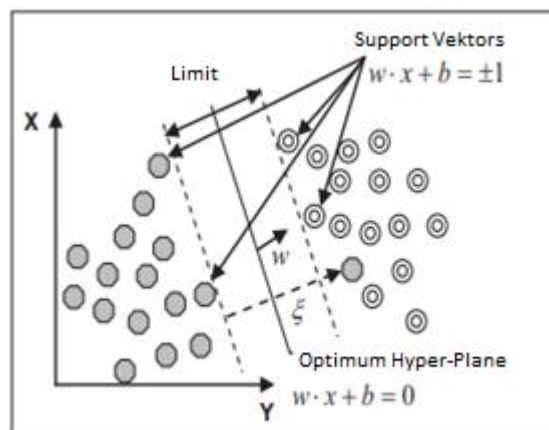
It is expressed as  $y_i(w \cdot x_i + b) - 1 \geq 0$  ve  $y_i \in \{1, -1\}$ . This can be solved using the Lagrange Equations.

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^k \alpha_i y_i (w \cdot x_i + b) + \sum_{i=1}^k \alpha_i \quad (8)$$

The equality is obtained. As a result, the decision function can be written in  $f(x) = \text{sign}(\sum_{i=k}^k \delta_i y_i (x \cdot x_i) + b)$  for a linearly separable problem (Kavzoglu & Colkesen, 2010).

### 3.4.2. For Linear Non-Separable Data

The problem that arises due to the fact that part of the training data remains on the other side of the optimal hyperplane is solved by defining a positive artificial variable ( $\epsilon_i$ ) (Figure 2). The equilibrium between the maximum of the limit and the minimization of errors can be controlled by defining an adjustment parameter indicated by C, which takes positive values.



**Figure 2.** Optimization problem for non-discriminatory data takes the form (García-Gonzalo et al, 2016);

$\min[\frac{\|w\|^2}{2} + C \cdot \sum_{i=1}^r \epsilon_i]$ . Sequences related to this take the shape of  $y_i(w \cdot \varphi(x_i) + b) - 1 \geq 1 - \epsilon_i$ ,  $\epsilon_i \geq 0$  ve  $i = 1, \dots, N$ .

Support vector machines can be mathematically transformed into non-linear transformations by means of a kernel function, which is expressed in the form of  $K(x_i, x_j) = \varphi(x) \cdot \varphi(x_j)$  and allows the separation of data in high dimensions. The solution of a two-class problem that cannot be separated linearly using the kernel function can be solved by the rule  $f(x) = \text{sign}(\sum_i \alpha_i y_i \varphi(x) \cdot \varphi(x_i) + b)$ . It is essential to determine the optimal parameters of

the kernel function and function to be used for a classification process to be performed with support vector machines (Kavzoglu & Colkesen, 2010).

### 3.5. Logistic Regression

The logistic regression predicts the probability of a result that can only have two values. Linear regression is not appropriate for the values that can be expressed in binary system as yes/no, exist/not. Because it can estimate the value outside the range 0 and 1. Logistic regression produces a limited logistic curve with values between 0 and 1. Logistic regression is similar to linear regression but is created by using natural logarithm of probabilities of target variable instead of curve probability (Manogaran, & Lopez, 2018).

Linear regression;

$$y = b_0 + b_1X \quad (9)$$

$$\text{Logit}(p)=\log(p/(1-p)) \quad (10)$$

In logistic regression  $b_0$  moves the slope to the right and left, while  $b_1$  defines the slope of the curve. The logistic regression equation can be written with the probability ratio (logit (p)) (Figure 3) (Akin, 2018).

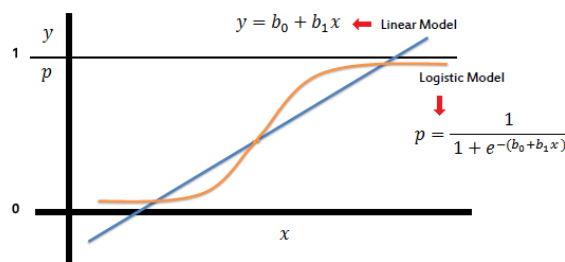


Figure 3. Logistic Regression (Akin, 2018)

Learning has been described by Simon as the process of improving behavior through the discovery of new information over time. The learning is called Machine learning when perform by a machine. The concept of improvement is the status of finding the best solution for future problems by gaining experience from the existing examples in the process of machine learning (Celik, 2018). With the development of information technologies over time, the concept of big data has emerged. The concept of big data is defined as very large and raw data sets that limitless and continue to accumulate, which cannot be solved by traditional databases methods (Altunisik, 2015).

The operations performed on the computer using the algorithm are performed according to a certain order without any margin of error. However, unlike the commands created to obtain the output from the data entered in this way, there are also cases where the decision making process takes place based on the sample data already available. In such cases, computers can make the wrong decisions such as mistakes that people can make in the decision-making process. In other words, machine learning is to gain a learning ability similar to human brain to computer by taking advantage of data and experience (Celik & Aslan, 2019).

The primary aim of machine learning is to develop models that can train to develop themselves and by detecting complex patterns and to create models to solve new problems based on historical data (Turkmenoglu, 2016).

With the advancement of technology, machine learning approaches increase its importance in many areas. For example, smart spam classifiers classify emails from large amounts of spam data and user feedback. Advertising systems try to match ads and content accurately; fraud detection systems protect structures such as banks from malicious acts.

### 3.6. Linear Regression

Linear regression is a statistical approach used to model the relationship between the dependent variable and one or more independent variables. If the number of independent variables is one, it is called simple linear regression, and if there are more than one independent variable, it is called multiple linear regression (David, 2009). When the number of dependent variables is more than one, it is called multivariate linear regression (Rencher & Christensen, 2012).

### 3.7. Confusion Matrix

The mess matrix shows the correct class of data and the number of classes estimated (Table 1).

**Table 1.** Confusion Matrix (Celik, & Osmanoglu, 2019)

		Actual Values	
		Positive (1)	Negative (0)
Predicted Values	Positive (1)	TP	FP
	Negative (0)	FP	TN

TP: True Positive FP: False Positive TP: True Positive FP: False Positive

Accuracy of the model; is the ratio of the number of accurately classified samples (TP + TN) to the total number of samples (TP + TN + FP + FN). The error rate is calculated by subtracting the accuracy rate from 1. In other words, it is the ratio of the number of misclassified samples (FP + FN) to the total number of samples (TP + TN + FP + FN) (2011Celik, & Osmanoglu, 2019).

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (11)$$

## 4. Experimental Results

### 4.1. Data Set

In this section, a data set consisting of Facebook comments about different companies is used. The comments in the data set were divided into three classes as positive, negative and neutral by using the manual procedure and converted into a data set training set. Firstly, 5000 data from the tagged data was used for training. However, since the results obtained for this model were below the expectations, the data set was improved. For this, 1004 positive, 1000 and neutral 1000 in total 3004 comments were taken. 75% of these data were used for training and 25% for testing.

#### 4.1.1. Data Set Properties

In this section, all comments are converted to lowercase letters and Turkish characters have been converted to Latin alphabet letters (ç-ı-ö-ı-u letters to c-g-i-o-u). Numbers, special characters, emojis, unnecessary words (with, one, -s, etc.) and non-Latin interpretations have been extracted.

The reason why Turkish characters are changed in Latin alphabet is because social media expresses a universal integrity. Furthermore, it is seen that the Turkish alphabet was not used correctly in the comments made about the firms.

**Table 2.** Examples and Classes from Data Set

CLASS	SAMPLE DATA
<b>Negative</b>	telefon ekrani soguk havada calismiyormus
<b>Positive</b>	goruntu guzel
<b>Neutral</b>	Lazer yazici nekadar fiyati ogrenebilir miyim

## 5. Result and Discussion

Interpretations in the data set were modeled using Multinomial Naive Bayes, Random Forest, Support Vector Machines and Logistic Regression classification algorithms using the Python programming language in Jupyter Notebook using the machine learning methods supervised learning approach.

The data set consisting of 1004 positive, 1000 negative and 1000 neutral were used 75% of them for the training, the remaining (25%) for the test.

It would be more appropriate to compare the studies conducted in similar regions to alleviate the impact of regional differences on emotion analysis. The line with this opinion is taken into account in studies in Turkey. The data set resources used in these studies are surveys, tweets, film reviews, comments on e-commerce sites, comments on facebook and comments in the call center. It is observed that the success rate of the studies has ranged from 42 to 91%. One of the biggest constraints of emotion analysis through interpretation is the non-observance of the grammar rules. Due to similar reasons, the accuracy rate range remains wide.

As a results of our study were examined, the best result with 0.7 accuracy of the model test of the Logistic Regression algorithm and with the accuracy of 0.56 of the KNN algorithm produced the lowest result. No significant differences were observed in TF-IDF and Count Vectorizer + TF-IDF comparison (Table 3).

**Table 3.** TF-IDF and Vector Analysis + TF-IDF Model Achievements and Comparison

Algorithms	TF-IDF	Count Vectorizer+TF-IDF
<b>Multinomial NB</b>	0.65	0.65
<b>Random Forest</b>	0.63	0.65
<b>Logistic Regression</b>	0.7	0.7
<b>KNN</b>	0.56	0.56
<b>Support Vector Machines</b>	0.67	0.67

### Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

### References

- Akbas, E. (2012). Aspect based opinion mining on Turkish tweets. The Graduate School of Engineering and Science of Bilkent University, Ankara.
- Akgul, E. S., Ertano, C., & Diri, B. (2016). Twitter verileri ile duygu analizi.
- Akin, C. E. (2018). "Logistic Regression", <http://cagriemreakin.com/veri-bilimi/logistic-regression-classification-8.html>,
- Aksu, M. C., & Karaman, E. (2017). Karar Ağaçları ile Bir Web Sitesinde Link Analizi ve Tespiti. *Acta INFOLOGICA*, 1(2), 84-91.
- Altunisik, R. (2015). Büyük Veri: Fırsatlar Kaynağı mı Yoksa Yeni Sorunlar Yumağı mı?. *Yildiz Social Science Review*, 1(1).
- Andrade, D., Tamura, A., & Tsuchida, M. (2019). Analysis of the Use of Background Distribution for Naive Bayes Classifiers. *Journal of Intelligent Systems*, 28(2), 259-273.
- Ardil, E. (2009). Esnek hesaplama yaklaşımı ile yazılım hata kestrimi (Master's thesis).
- Aytug, O., & Korukoglu, S. (2016). Makine öğrenmesi yöntemlerinin görüş madenciliğinde kullanılması üzerine bir literatür araştırması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(2), 111-122.
- Baykara, M., Gurturk, U., & Teknolojileri, N. B. (2017). Sosyal Medya Paylaşımının Duygu Analizi Yöntemiyle Sınıflandırılması, 2. International Conference on Computer Science and Engineering, 911-916.
- Boynukalin, Z. (2012). Emotion analysis of Turkish texts by using machine learning methods. Middle East Technical University.
- Calis, K., Gazdagi, O., & Yildiz, O. (2013). Reklam İçerikli Epostaların Metin Madenciliği Yöntemleri ile Otomatik Tespiti. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 6(1), 1-7.
- Cavnar, W. B., & Trenkle, J. M. (1994). N-gram-based text categorization. In *Proceedings of SDAIR-94, 3rd annual symposium on document analysis and information retrieval* (Vol. 161175).
- Celik, O., & Aslan, A. F. (2019). Gender Prediction from Social Media Comments with Artificial Intelligence. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(6), 1256-1264.
- Celik, O., & Osmanoglu, U. O. (2019). Comparing to Techniques Used in Customer Churn Analysis. *Journal of Multidisciplinary Developments*, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 30-38. ISSN 2564-6095.
- Celik, O. (2018). A Research on Machine Learning Methods and Its Applications. *Journal of Educational Technology and Online Learning*, 1(3), 25-40.
- David A. F. (2009). *Statistical Models: Theory and Practice*. Cambridge University Press. p. 26. A simple regression equation has on the right hand side an intercept and an explanatory variable with a slope coefficient. A multiple regression equation has two or more explanatory variables on the right hand side, each with its own slope coefficient
- Durahim, A. O., Coskun, S. A., Basarir, O. B., & Kebapci, H. (2018). Music emotion classification for Turkish songs using lyrics. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(2).
- Garcia, S., & Yin, P. (2015). User Review Sentiment Classification and Aggregation.
- García-Gonzalo, E., Fernández-Muñiz, Z., García Nieto, P., Bernardo Sánchez, A., & Menéndez Fernández, M. (2016). Hard-rock stability analysis for span design in entry-type excavations with learning classifiers. *Materials*, 9(7), 531.
- Gozukara, F., & Ozel, S. A. (2016). An Experimental Investigation of Document Vector Computation Methods for Sentiment Analysis of Turkish and English Reviews.
- Kavzoglu, T., & Colkesen, I. (2010). Destek vektör makineleri ile uydu görüntülerinin sınıflandırılmasında kernel fonksiyonlarının etkilerinin incelenmesi. *Harita Dergisi*, 144(7), 73-82.
- Kaynar, O., Gormez, Y., Yildiz, M., & Albayrak, A. (2016). Makine öğrenmesi yöntemleri ile Duygu Analizi. In *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP'16)*, September (pp. 17-18).

- Manogaran, G., & Lopez, D. (2018). Health data analytics using scalable logistic regression with stochastic gradient descent. *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, 10(1-2), 118-132.
- Nalcakan, Y., Bayramoglu, S. S., & Tuna, S. (2015). Sosyal Medya Verileri Üzerinde Yapay Öğrenme ile Duygu Analizi Çalışması. Technical Report.
- Pham, B. T., Jaafari, A., Prakash, I., & Bui, D. T. (2019). A novel hybrid intelligent model of support vector machines and the MultiBoost ensemble for landslide susceptibility modeling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(4), 2865-2886.
- Rencher, A. C., Christensen, W. F. (2012), "Chapter 10, Multivariate regression – Section 10.1, Introduction", *Methods of Multivariate Analysis*, Wiley Series in Probability and Statistics, 709 (3rd ed.), John Wiley & Sons, p. 19, ISBN 9781118391679.
- Sebastian R. (2015). *Python Machine Learning*. Birmingham.UK: Packt Publishing, 2015. ISBN: 978-1783555130.
- Turkmenoglu, C. (2016). *Türkçe Metinlerde Duygu Analizi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Yigit, I. O. (2017). *Çağrı Merkezi Metin Madenciliği Yazılım Çerçevesi*.



## BULANIK AKSİYOMATİK TASARIM VE HEDEF PROGRAMLAMA YAKLAŞIMLARIYLA BİR ÜRÜN TASARIMI

Muhammed KIR, Özer UYGUN, Sena KIR\*

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Ürün Tasarımı Problemi,  
Hedef Programlama,  
Bulanık Aksiyomatik  
Tasarım.

### Öz

Bu çalışmada, içecek sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın ürün tasarım problemi ele alınarak, literatürde ilk kez Bulanık Aksiyomatik Tasarım (BAT) ve Hedef Programlama yaklaşımlarının birlikte kullanılmasıyla çözülmüştür. Problemde tasarlanacak olan ürünün mevcut hat spesifikasyonlarında değişikliğe neden olmaması, üretim hızını belirli bir seviyede tutması ve aynı zamanda müşteri beğenisine de hitap etmesi hedeflenmektedir. Bu hedeflerden müşteri beğenisi, insanın doğal karar verme süreçlerini daha iyi ifade edebilmesi bakımından bulanık verilerle ifade edilmiştir. Çalışmada müşteri beğenisine ait bulanık veriler BAT tekniği ile durulaştırılmıştır ve elde edilen değerler, söz konusu üç hedefi de dikkate alan bir 0-1 karma tam sayılı doğrusal olmayan hedef programlama modeline parametre olarak girilmiştir. Modelin çözümünde nihai ürünün belirli parametrelerinin değerleri elde edilmiştir. Bu değerlere göre tasarımı yapılan şişenin silme hacmi hesaplanmaktadır. Silme hacme göre de, yeni tasarımın üretim hattı spesifikasyonlarını sağlayıp sağlamadığı, üretim hızının ortalama değeri ve müşteri beğenisine hitap edip etmediği anlaşılabilir. Önerilen çözüm yaklaşımı sayesinde, problem analitik olarak ele alınmış, firmanın ürün tasarımında başvurduğu deneme yanılma yöntemi terk edildiği için de hem zamandan, hem iş gücünden, hem de kalıp ve preform maliyetlerinden tasarruf sağlanmıştır.

## A PRODUCT DESIGN BY FUZZY AXIOMATIC DESIGN AND GOAL PROGRAMMING APPROACHES

### Keywords

Product Design Problem,  
Goal Programming,  
Fuzzy Axiomatic Design.

### Abstract

In this study, a product design problem of a company operating in the beverage sector was handled and solved for the first time in the literature by Fuzzy Axiomatic Design (BAT) and Goal Programming approaches. It was aimed at the product to be designed does not cause a change in the current line specifications, keep the production speed to a certain level and also address customer satisfaction at the same time. Customer satisfaction goal was expressed by fuzzy data in order to better express the natural decision-making processes of human. In the study, fuzzy data belonging to customer satisfaction were defuzzified by BAT technique and the obtained values were entered as a parameter to a mixed integer nonlinear goal programming model which considers three goals. The values of certain parameters of the final product were obtained from the solution of the model. The brimful capacity of the designed bottle was calculated according to these values. Depending on the brimful capacity, it can be understood whether the new design meets the specifications of the production line, the average value of the production speed and the satisfaction of the customer. Through the proposed solution approach, the problem was dealt with analytically. The trial and error method used by the company was abandoned to save both the labor force and the mold and preform costs.

### Alıntı / Cite

Kır, M., Uygun, Ö., Kır, S., (2020). Bulanık Aksiyomatik Tasarım ve Hedef Programlama Yaklaşımlarıyla Bir Ürün Tasarımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 375-387.

\* İlgili yazar / Corresponding author: senas@sakarya.edu.tr, +90-264-295-5965



Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
M. Kır, 0000-0003-3143-4322	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	07.05.2019
Ö. Uygun, 0000-0002-8437-7678	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	11.04.2020
S. Kır, 0000-0002-5615-8814	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	08.06.2020
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Günümüz rekabet koşulları işletmeleri bir taraftan piyasada farklılaşmaya zorlarken, diğer taraftan da maliyetlerini düşürmeye zorlamaktadır. Müşterilerin lehine oluşan bu rekabet ortamı, onların tedarikçilerinden aldığı ürün ve hizmetlerin kalite standartlarını her geçen gün artırmalarına sebep olmaktadır. Bu koşullarda işletmelerin müşterilerinin beklentisini karşılayacak olan ürünleri en özgün tasarımlarla, müşterilerinin beklentisini karşılayacak olan fiyatlardan, en kısa sürede müşterilerine ulaştırmalarını zorunlu kılmıştır. Bu beklentileri karşılayabilmek için işletmeler birçok ürün tasarımı ve üretim problemleriyle karşı karşıya kalmıştır.

Özellikle kâr marjlarının çok düşük, pazardaki ürün yaşam döngüsünün çok kısa, pazarlama ve ürün tutundurma maliyetlerinin yüksek, müşteri beğeni kriterlerinin değişken ve çeşitli, yatırım maliyetlerinin yüksek ve yatırımı hayata geçirme sürelerinin de uzun olduğu içecek sektöründe yeni ürünler çıkarmak firmalar için alınması zor kararlardandır.

İçecek sektöründe pazara yeni sunulan ürünlerin büyük çoğunluğunun satış miktarları, ürünün piyasaya sürülmesi sürecindeki tasarım, pazarlama ve yatırım maliyetlerini karşılayamadan ürün yaşam döngüsü sürecini tamamlamaktadır. Bu sebeple firmalar maliyetlerini düşürebilmek ve ürün yaşam döngüsündeki gelişme ve olgunluk sürelerini uzatabilmek için birçok kriteri göz önüne alarak çok fazla hedef ve kısıtı sağlayabilmek için farklı yöntemler araştırmaktadırlar.

İçecek sektöründe ve birçok sektörde ambalaj, müşteri beğenisini ve tercihlerini etkileyen bir faktördür. Ambalajın ürün satışı üzerindeki etkisi her geçen gün artmaktadır. Ambalajın öneminin artmasına sebep olan bir diğer faktör de müşterinin birçok satış kanalında (marketler, e-ticaret portalları vb.) direk ürünün ambalajı ile karşı karşıya kalmasıdır. Bu da ambalajın satış üzerindeki etkisinin artmasına sebep olmuş ve ambalaj pazarlamanın ayrılmaz bir parçası haline getirmiştir. Firmalar yeni ürün çalışmaları yaparken en beğenilen ambalaj tasarımını oluşturmaya çalışmaktadırlar. Müşteri beğenisini ölçmek için anketler ve çeşitli istatistiksel metotlar kullanılmaktadır. Tüm bu faktörler işletmelerin yeni ürün çalışmalarında ambalaj tasarımlarına verdikleri önemin artmasına ve ayırdıkları bütçeleri artırmalarına sebep olmaktadır.

Bu çalışmanın amacı içecek sektöründe yaşanan bu problemlere farklı bir bakış açısı ile çözüm getirmektir. Çalışmanın uygulama ayağı, meyve suyu ve içecek sektöründe faaliyet gösteren bir firmada yapılmıştır. Firmanın bir müşterisi aseptik pet hattında 1000 ml hacmindeki bir ürününün fason üretimini yaptırmak istemektedir. Müşteri, ilk parti olarak az miktarda bir üretim yapılmasını talep etmekte, eğer ürünün pazardaki satış performansı beklentilerini karşılırsa üretimi devam ettirme, aksi takdirde üretimi durdurma seçeneklerini de göz önünde bulundurmaktadır. Bu sebeple de oluşacak olan sabit maliyetlere (kalıplar ve reçeteler) katlanmak istememektedir. Birim başına düşen sabit maliyetin artması durumunda da proje olurlu olmayacağından hayata geçirilemeyecektir. Bu sebeple firma, yeni 1000 ml içecek ürününün, mevcut üretim hattında yeni kalıp yatırımları yapılmadan var olan 1000 ml içecek üretim kalıpları kullanılarak, en düşük maliyetlerle, makul üretim hızı ve en yüksek müşteri beğenisini sağlayacak şekilde üretilmesi mümkün olan şişe tasarımını belirleme çalışmasına ihtiyaç duymuştur. Firmanın içinde bulunduğu bu durum ve çözmesi gereken ürün tasarımı problemi, bu çalışmanın motivasyonunu oluşturmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan ürün tasarımı probleminin çözümü için bulanık aksiyomatik tasarım (BAT) ve hedef programlama yaklaşımları kullanılmış, müşteri beğenisi, üretim hızı ve üretim hattı kriterleri hedeflerini sağlayacak olan en uygun tasarım spesifikasyonları belirlenmiştir. 'Satış ve Pazarlama Departmanı' tarafından yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulanık müşteri beğenisi verileri, öncelikle BAT yöntemiyle durulaştırılmış, üretim hızı ve üretim hattı spesifikasyonları ile birlikte hedef programlama yaklaşımıyla tüm hedefleri sağlayacak olan en uygun çözüm (tasarım spesifikasyonları) elde edilmiştir.

Bu makalenin ilerleyen bölümlerini kısaca ifade etmek gerekirse; ikinci bölümünde aksiyomatik tasarım (AT), BAT ve hedef programlamayla ilgili yapılan bilimsel yazın taraması verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde, ele alınan problemin detayları paylaşılmıştır. Dördüncü bölümde de BAT ve hedef programlama yaklaşımlarının problemin çözümü için nasıl kullanıldığı detaylı olarak verilmiştir. Çalışmanın beşinci bölümünde ise göz önüne alınan hedefler üzerinden farklı senaryolar üretilmiş, üretilen senaryolar önerilen çözüm yaklaşımıyla farklı bakış açılarına göre de çözülmüş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Çalışmanın altıncı, yani sonuç bölümünde ise

tüm çalışmayı kapsayan sonuçlar değerlendirilmiştir.

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Bu çalışmada ele alınan ürün tasarımı probleminin çözümü için hem BAT hem de hedef programlama tekniği önerilmektedir. Ürün tasarımı konusunda AT ve BAT teknikleri ile yapılmış çalışmalar daha fazladır. Hedef programlama tekniği birden fazla hedefin bir arada düşünülerek çözüm arandığı problemler için çok sıklıkla tercih edilen bir tekniktir. Bu çalışmada ele alınan ürün tasarım problemi de birden fazla hedef içerdiğinden çözüm için BAT'ın yanı sıra hedef programlama tekniği de tercih edilmiştir. Bu yöntemlerle ilgili literatürdeki bazı çalışmalara ait incelemelere bu bölümde yer verilmiştir.

AT, karmaşık ürünlerin veya sistemlerin tasarımındaki karar verme sürecine yardımcı olması amacıyla Suh (1990) tarafından geliştirilmiş bir bilimsel tasarım yöntemidir. Bu yöntemin temel amacı, tasarımlar için bilimsel bir temel oluşturmak ve tasarımcıyı, mantıklı düşünce süreçleri ve araçları ile destekleyerek tasarım faaliyetlerini geliştirmektir. Ayrıca bu yöntem tasarım yaratıcılığını artırır, rassal araştırma sürecini bir metodolojiye dayandırarak deneme yanılma faaliyetlerini azaltır ve tasarımcının hedeflenen fikirlere odaklanmasını sağlamaktadır. AT yöntemi, başlangıçta ürün tasarım probleminin çözümü için geliştirilmiştir. Daha sonra ürün tasarımının yanı sıra sistem, organizasyon ve yazılım gibi birçok alanda tasarım yapılırken ve seçim problemlerinde karar destek amaçlı da kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmaların bazılarında kesin bilgi ve/veya sayılarla işlem yapılırken bazılarında bulanık veya kararsız bulanık sayılarla da işlem yapılmaktadır. BAT yöntemini ilk kez Kulak ve Kahraman (2005a) ileri imalat sistemlerinin çok kriterli karşılaştırılmasında kullanmışlardır.

Fiziksel tasarım alanında AT tekniğinin kullanıldığı çalışmalardan biri Lee vd. (2001) tarafından sunulmuştur. Çalışmada, AT'nin sistematik tasarım yaklaşımı makine kontrol sistemleri üzerinde uygulanmış ve endüstriyel ölçüde kimyasal-mekanik parlatma makinesi geliştirilmiştir. Jang vd. (2002), AT'nin denizcilik alanındaki uygulanabilirliğini, metal destek optimizasyon problemi, bir ana motor seçim problemi ve mavna tasarım problemi örnekleriyle araştırmışlardır. Bu örneklerle, tasarım aksiyomlarının denizcilik tasarımı gibi farklı bir alanda farklı tipteki problemler üzerinde uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Helander ve Lin (2002) çalışmalarında, AT'yi ergonomik tasarıma bir altyapı olarak göstererek, AT'nin el araçlarının biyomekaniksel tasarımı ve işyerlerinin antropometrik tasarımı için nasıl kullanıldığını farklı örneklerle anlatmış ve tartışmışlardır. Kim (2004), yeni bir ürün geliştirilmesi sırasında karşılaşılan problemleri gidermek için ürün tasarımı ve üretim sistemi tasarımını birleştirmeye yönelik aksiyomlarla tasarım ilkelerini kullanarak yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu çalışmaya benzer şekilde, geliştirilen bu yaklaşımın amacı yeni ürün geliştirilmesi sürecini zora sokan, yeni ürünün üretim sistemine uygun olarak yeniden tasarlanması veya üretilmesine yönelik üretim sisteminde değişikliklerin yapılması gibi sorunları tasarımın ilk evresinde ortadan kaldırarak, yeni ürün tasarımındaki zahmetli aşamaları azaltmak ve önlemektir. Houshmand ve Jamshidnezhad (2006) de yalın üretim sistemi tasarımı için proses değişkenlerini kullanarak aksiyomatik bir modelleme sunmuşlardır. AT metodolojisine göre, fonksiyonel ihtiyaçlar, tasarım parametreleri ve proses değişkenlerini kapsayan yalın bir üretim sisteminin tasarım sürecini modellemek için hiyerarşik bir yapı geliştirmişlerdir. Lee ve Shin (2008), TFT ve LCD ekranların temizliği için kullanılacak bir su püskürtücü tasarımı için AT yönteminin bağımsızlık aksiyomu tabanlı bir ürün tasarım yöntemi önermişlerdir. Cavique ve Gonçalves-Coelho (2009), AT'yi yeni tasarım geliştirmeye yardımcı olan ve tasarımın kalitesinin değerlendirilmesine olanak sağlayan bir teori olarak tanımlamışlar ve bu yöntemi, konfor ve enerji tüketimini göz önüne alarak Güney Avrupa iklimindeki ofis binalarının havalandırma sistemlerinin tasarımında kullanmışlardır. Janthong vd. (2010) de AT prensiplerini durum tabanlı çıkarsama teknikleri ile birleştirerek, bilgi tabanlı yeni bir tasarım tekniği geliştirmişler ve bu tekniği spesifik endüstriyel ürünlerin tasarımı için uygulamışlardır. Beng ve Omar (2014) çalışmalarında, sürdürülebilir ürün tasarımının karar verme sürecinde AT prensiplerinin kullanıldığı bir çerçeve önermektedirler. Lu vd. (2016) ise etkileşimli tasarım ile AT prensiplerinin birlikte kullanıldığı bir tasarım metodu geliştirmişlerdir.

Karsak vd. (2003), çalışmalarında bir ürün tasarım problemini ele almışlar ve elde edilen ürün teknik gereksinimlerinin önem düzeylerini belirlemek için Analitik Ağ Süreçlerini (ANP) kullanmışlardır. Maliyeti, genişletilebilirlik seviyesini ve ürünün tasarımında göz önünde bulundurulacak ürün teknik gereksinimlerini belirlemek için üretilebilirlik düzeyi hedeflerini de içeren 0-1 tam sayılı bir hedef programlama modeli önermişlerdir. Büyükoçkan ve Berkol (2011) çalışmalarında, sürdürülebilir bir tedarik zincirinin tasarım gereksinimlerini belirlemek için ANP, Kalite Fonksiyon Göçerimi ve 0-1 tam sayılı hedef programlama modellerini kullanarak bir çerçeve sunmuşlardır. Tyagi vd. (2012) toplam faydayı en üst düzeye çıkarmak ve toplam üretim maliyetini en aza indirmek amacıyla cep telefonu ürün ailesi tasarımı ve çoklu platform mimarisinin keşfedilmesi problemini ele alarak çözüm için bir bulanık hedef programlama yaklaşımı önermişlerdir. Brandenburg (2015) de çalışmasında ekonomik ve çevresel kriterler göz önünde bulundurularak yeni bir tüketici ürünü için tedarik zinciri yapılandırmasını optimize eden bir hedef programlama yaklaşımı önermiştir.

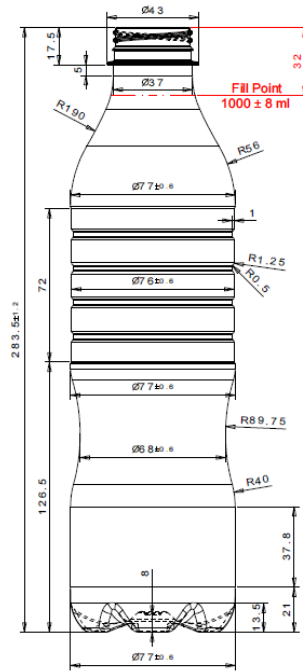
Yapılan bilimsel yazın taramasına göre çözüm mantığı açısından bu çalışmada savunulan çözüm mantığına en yakın çalışma, Karsak ve vd. (2003)'nin çalışması olarak gösterilebilir. Ayrıca fiziksel bir ürün ya da sistem tasarımı problemini ele alan araştırmacıların AT veya BAT ile hedef programlama yaklaşımını bir arada kullandıkları herhangi bir çalışmaya da rastlanmamıştır. Bu bağlamda, bu çalışma iki yöntemin birlikte ele alındığında bulanık veriler içeren ürün tasarım problemlerinde pratik olarak kullanılabileceğini ve başarı ile sonuç verebileceğini gösteren tek çalışma olarak literatüre katkı sağlamaktadır.

### 3. Problemin Tanımı (Definition of the Problem)

Bu çalışmanın motivasyonunu oluşturan içecek sektöründe Türkiye'nin önde gelen firmalarından birinin dışarıya fason olarak üreteceği, sonrasında seri üretime devam edip etmeyeceği belli olmayan bir ürün için karşı karşıya kaldığı ürün tasarımı probleminin çözümü için önerilen yaklaşımı anlatmadan önce, problemin detaylarını incelemek faydalı olacaktır.

Firma aseptik pet hattında müşterisi tarafından talep edilmiş olan yeni 1000 ml içecek ürününü, mevcut hattında yeni kalıp yatırımları yapmadan var olan 1000 ml içecek üretim kalıplarını kullanarak, en düşük maliyetlerle ve en fazla müşteri beğenisini sağlayarak üretmek istemektedir. İşletmenin elindeki mevcut 1000 ml şişe tasarımı fason üretim yapmakta olduğu bir başka müşteriye ait olduğundan, bu şişe tasarımını kendi ürünlerinde ve yeni müşterileri için yapacağı fason üretimlerde yasal olarak kullanamamaktadır. Söz konusu yeni ürün için yeni şişe tasarımı yoluna gidilmesi, yeni kalıplar ve aseptik pet hattında yeni yatırımlar yapılmasına sebep olabilecektir. İşletme toplam maliyetini en küçükmek için yeni 1000 ml ürün tasarımını var olan 1000 ml şişe tasarımına ait kalıpları kullanabilecek şekilde tasarlamak istemektedir. Buna istinaden de mevcut şişe tasarımları üzerinde modifikasyon yapılma yoluna gidilmesi tercih edilmektedir. Üzerinde modifikasyon yapılacak referans şişenin teknik resmi Şekil 1'de verilmiştir. Bu referans şişe tasarımının taban çapı ve taban boyu üzerinde değişiklik yapılması kararlaştırılmıştır. Şişe tasarımları için bir tedarikçiden hizmet alınmaktadır. Tedarikçi ile yapılan tasarım çalışmaları genel olarak deneme yanılma şeklindedir. Bu aşamada örnek tasarımın reddedilme ihtimalinin en aza indirilmesi için tedarikçi firmaya birçok açıdan uygun olması muhtemel yeni şişe spesifikasyonlarının verilebilmesi için bir ön tasarım çalışmasına ihtiyaç vardır.

Yeni tasarımın üretim hattında en az modifikasyon ve kalıp yatırımına sebep olması ve üretim kaynaklarının en uygun şekilde kullanılabilmesine imkân sağlaması gerekmektedir. Özellikle shrink (paketleme) makinesinde yeni mekanik donanım ve şişeye uygun program ihtiyacı oluşmaması, shrink makinesinde var olan 1000 ml şişe programının kullanılabilmesi talep edilmektedir. Paletleme makinesinde ise mevcut olan 1000 ml şişeye ait program kullanılarak paletleme yapılmak istenmektedir. Yeni tasarıma ait paletleme programı maliyetine katlanılmak istenmemektedir.



Şekil 1. Referans şişenin teknik resmi (Technical drawing of the reference bottle)

Yeni program için paletleme makinesinin yurt dışı servisinden program ve servis desteği alınması gerekmektedir.

Dolum makinesinde ise şişe tasarımından dolayı dolumu yapılacak üründe köpürme problemi olması sebebiyle üretim hızının belirli bir seviyede tutulması hedefinin sağlanması istenmektedir.

Özetle, firma shrink ve paletleme makinelerinde yeni kalıp ve program yatırımları yapmamak için elindeki mevcut 1000 ml içecek şişesinin kalıp ve programlarını kullanmak istemektedir. Bu sebeple mevcut 1000 ml şişesine ait aşağıdaki hat ve müşteri beğenisi kısıtlarını göz önüne alarak yeni şişe tasarımı yapmak istemektedir:

-Şişe boyu 275 mm'den büyük, 300 mm'den küçük olmalıdır. Aksi halde paletleme makinesinde var olan 1000 ml şişeye ait program (reçete) kullanılamayacaktır. Böyle bir durumda da yeni paletleme programı için ilave 56.775 TL + KDV kadar bir yatırıma ihtiyaç duyulacaktır. Buna göre, mevcut hattın yatırım yapılmadan kullanılabilmesi için yeni tasarımın boyundaki artış referans şişeden en fazla 16,5 mm, azalış en fazla 8,5 mm olabilir.

-Şişe taban çapı 70 mm'den büyük, 80 mm'den küçük olmalıdır. Aksi halde shrink makinesinde var olan 1000 ml şişe programı kullanılamayacaktır. Böyle bir durumda da yeni shrink programı ve mekanik ekipman için ilave 110.000 TL + KDV kadar bir yatırıma ihtiyaç duyulacaktır. Buna göre, mevcut hattın yatırım yapılmadan kullanılabilmesi için yeni tasarımın çapındaki artış referans şişeden en fazla 3 mm, azalış en fazla 7 mm olabilir.

-Silme hacim, bir şişe kapak (ağız) kısmına kadar doldurulduğunda almış olacağı ürünün hacmine verilen isimdir. Tasarımı yapılan şişenin silme hacmi 1114,16 ml ve üzerinde olursa makine dolum hızı 30.000 şişe/saat olmaktadır. Silme hacim 1064,16 ml ve altında olursa da makine dolum hızı 18.000 şişe/saat olmakta ve üretim hızı yavaşlamaktadır. Yine bu da istenmeyen bir durumdur. Ayrıca silme hacim en az 1028,5 ml olmalıdır çünkü daha alt hacimlerde dolum 1000 ml olarak yapılamamaktadır.

Mevcut üretim hattının kullanılabilmesi için yapılacak 1000 ml şişe tasarımının parametrelerini Tablo 1'deki gibi özetleyebiliriz:

**Tablo 1.** Mevcut hattın kullanılabilmesi için tasarım limitleri (Design limits for using the existing line)

Tasarım Parametresi	≥	≤
Şişe Boyu (mm)	275	300
Şişe Taban Çapı (mm)	70	80
Silme Hacim (ml)	1028,5	1124

Yeni şişe tasarımında bu parametrelerin yanı sıra dikkate alınması gereken önemli bir nokta da, şişenin doluluk görüntüsünün müşteri üzerindeki etkisidir. Şöyle ki; şişe içerisindeki içecek tam 1000 ml bile olsa, kapak kısmının çok altında bir doluluk görüntüsüne sahip ise bu durum, müşteride olumsuz bir etki yapacak, şişenin az dolu olduğunu düşünmesine sebep olacaktır. Tam tersi, şişe kapak noktasına kadar dolu ise, müşteri şişeyi açtığında içecek dökülecek ve bu da olumsuz bir etki bırakacaktır. Bu noktada görüntünün müşteri beğenisi ile olan bağlantısının önemini de dikkate almak gerekmektedir. 'Satış ve Pazarlama Departmanı' ile yapılan ortak çalışmada şişenin 'silme hacminin' değişimine göre müşteri beğenisinin ne olabileceği bulanık olarak tespit edilmiştir ve Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Silme hacimlere bağlı müşteri beğenisini temsil eden bulanık ifadeler (Fuzzy expressions representing customer tastes based on brimful capacity)

Silme Hacim	Müşteri Beğenisi
1114 ml - 1124 ml	Çok Az
1090 ml - 1114 ml	Az
1028,5 ml - 1050 ml	Orta
1050 ml - 1090 ml	Çok

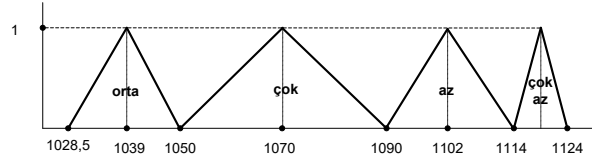
Bu durumda, müşteri beğenisini de şişe tasarım parametreleri içerisinde değerlendirmek gerekmektedir. Fakat veriler, şişe tasarımı için geliştirilen matematiksel programlama modeline direkt olarak yazmaya uygun formatta değildir. Müşteri beğenisini gerçek anlamda temsil edebilecek verilerin elde edilebilmesi için, literatürde ürün tasarımında tercih edilen bir yöntem olan BAT yöntemi kullanılmıştır. BAT tekniği ile bu veriler, geliştirilen matematiksel modele uygun formata dönüştürülmüştür.

#### 4. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Çalışmada ürün tasarımı için göz önüne alınan hedeflerden biri olan müşteri beğenisi, bulanık veriler içermektedir. Bunun için öncelikle BAT tekniği kullanılarak bu veriler durulaştırılmıştır. Durulaştırılan müşteri beğenisi hedefine ait veriler, hat spesifikasyonları ve hat hızı hedeflerine ait verilerle birlikte önerilen bir 0-1 karma tam sayılı doğrusal olmayan hedef programlama modeline girilerek nihai tasarım spesifikasyonları elde edilmiştir.

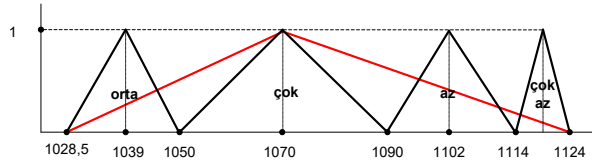
#### 4.1. Bulanık Aksiyomatik Tasarım ile Durulaştırma (Defuzzification with Fuzzy Axiomatic Design)

Öncelikle 'Satış ve Pazarlama Departmanı' ile yapılan ortak çalışma neticesinde silme hacim ve müşteri beğenisi arasındaki ilişki, Kulak ve Kahraman'ın (2005a, 2005b) çalışmalarından esinlenilerek Şekil 2'deki gibi üçgensel bulanık sayılar ile ifade edilmiştir.



Şekil 2. Silme hacim ve müşteri beğenisi arasındaki ilişkiyi temsil eden üçgensel bulanık sayılar (Triangular fuzzy numbers representing the relationship between brimful capacity and customer satisfaction)

Daha sonra da istenen en düşük silme hacim değerinin 1028,5 ml ve en yüksek değerinin de 1124 ml olabilmesi göz önünde bulundurularak, üçgensel tasarım alanı 1028,5 ml ile 1124 ml arasında ve müşteri beğenisinin çok olduğu 1050 ml ile 1090 ml arasındaki orta olan 1070 ml'de en üst noktaya ulaşacak şekilde Şekil 3'teki gibi ifade edilmiştir.



Şekil 3. Üçgensel tasarım alanı (Triangular design area)

Buna göre her bir üçgensel alanın (beğeni ifadesinin) bilgi içeriğini hesaplamamız gerekmektedir. 1028,5 ml ile 1050 ml arasındaki 'Orta' ile ifade edilmiş olan alanın bilgi içeriği Eşitlik 1'deki gibi hesaplanmıştır (Kulak ve Kahraman, 2005b).

$$I_{\text{orta}} = \log_2 \left( \frac{\text{sistem alanı}}{\text{ortak alan}} \right) = \log_2 \left( \frac{10,75}{4,945} \right) = 1,12 \quad (1)$$

1050 ml ile 1090 ml arasındaki 'Çok' ile ifade edilmiş olan alanın bilgi içeriği Eşitlik 2'deki gibi hesaplanmıştır.

$$I_{\text{çok}} = \log_2 \left( \frac{\text{sistem alanı}}{\text{ortak alan}} \right) = \log_2 \left( \frac{20}{20} \right) = 0 \quad (2)$$

1090 ml ile 1114 ml arasındaki 'Az' ile ifade edilmiş olan alanın bilgi içeriği Eşitlik 3'teki gibi hesaplanmıştır.

$$I_{\text{az}} = \log_2 \left( \frac{\text{sistem alanı}}{\text{ortak alan}} \right) = \log_2 \left( \frac{12}{7,67} \right) = 0,632 \quad (3)$$

1114 ml ile 1124 ml arasındaki 'Çok Az' ile ifade edilmiş olan alanın bilgi içeriği Eşitlik 4'teki gibi hesaplanmıştır.

$$I_{\text{çok az}} = \log_2 \left( \frac{\text{sistem alanı}}{\text{ortak alan}} \right) = \log_2 \left( \frac{5}{0,75} \right) = 2,74 \quad (4)$$

Sonuç olarak silme hacimlerin temsil ettiği üçgensel alanların bilgi içerikleri Tablo 3'teki gibi elde edilmiştir.

Tablo 3. Silme hacimlerin temsil ettiği bilgi içerikleri (Information contents represented by brimful capacities)

Silme Hacim	Mevcut I
1028,5 ml - 1050 ml	1,12
1050 ml - 1090 ml	0
1090 ml - 1114 ml	0,632
1114 ml - 1124 ml	2,74

Yapılan bu işlemler sayesinde belirli silme hacimlere göre değişen müşteri beğenisini, geliştirilen matematiksel modelde temsil edebilecek değerlere ulaşılmıştır. Örneğin; 1028,5 ml - 1050 ml silme hacmin temsil ettiği üçgensel bölgenin I değeri, tasarım alanıyla olan kesişim değerine göre '1,12' olarak bulunmuştur. Ya da; 1050 ml - 1090 ml silme hacmin temsil ettiği üçgensel bölgenin I değeri, tasarım alanıyla olan tam kesişim değerine göre '0' olarak

bulunmuştur.

AT yönteminde, I değeri düşük olan alternatif seçilir. Ya da bir başka deyişle, bir ifadenin sistem alanıyla, tasarım alanının en yüksek kesişim değerini sağlaması o ifadeyi temsil eden durumun ne kadar tercih edilebileceğini gösterir. AT'deki işlemlerden dolayı sistem alanı ve tasarım alanı arasındaki en yüksek uyumluluğu sağlayan ifadenin bilgi içeriği en düşük olur. Dolayısıyla, I değerinin yüksek olması olumsuz etki yapar. Geliştirilen matematiksel modelde ise, müşteri tarafından beğenilmeyen bir silme hacim değerinin sapmasının çözümde en çok değeri alması gerekir. Burada BAT ve önerilen matematiksel modelin amaç fonksiyonu arasında ters bir ilişki söz konusudur. Buna bağlı olarak, I değerleri önerilen matematiksel modelin amaç fonksiyonuna yazılırken çarpma işlemine göre tersleri alınmıştır. Bu işlem yapıldıktan sonra da elde edilen I'ler 0-1 arasına çekilerek normalize edilmiştir. Buna göre normalize I değerleri Tablo 4'deki gibi bulunmuştur.

**Tablo 4.** Silme hacimlerin temsil ettiği normalize bilgi içerikleri (Normalized information contents represented by brimful capacity)

Silme Hacim	I'ların Çarpmaya Göre Tersleri	Normalize Değerler
1028,5 ml - 1050 ml	0,893	0,565
1050 ml - 1090 ml	Tanımsız*	M
1090 ml - 1114 ml	1,582	1
1114 ml - 1124 ml	0,35	0,221

\*(∞ olarak alınmıştır)

#### 4.2. 0-1 Karma Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Hedef Programlama Modeli ile Tasarım (Design with 0-1 Mixed Integer Nonlinear Goal Programming Model)

Yeni tasarımda dikkat edilmesi gereken bir başka husus da müşteri beğenisinin yanı sıra, yeni şişeye ait bazı ölçülerin aseptik dolun hattında modifikasyon maliyeti oluşturup oluşturmamasıdır. Referans alınan silme hacmi 1028,5 ml olan şişenin silindirik bölgesinin çapı 77 mm, boyu da 283,5 mm'dir. Aseptik hatta 70 mm'nin altında 80 mm'nin üzerinde çapa sahip, 275 mm'nin altında 300 mm'nin üzerinde boya sahip şişe dolunu yapılması durumunda oluşacak maliyetlerden daha önce söz edilmiştir. Buna istinaden, referans şişenin silindirik bölgesinin çapı 3 mm'den daha fazla artırılıp, 7 mm'den daha fazla azaltılamaz. Boyu da 8,5 mm'den daha fazla azaltılıp, 16,5 mm'den daha fazla artırılmaz. Bu sınırların dışına çıkılması durumunda dolun hattında modifikasyon yapılması gerekir. Bu sınırların aşılması durumunda ortaya çıkacak ek maliyet matematiksel modelde ifade edilmiştir.

Müşteri beğenisi ve hat spesifikasyonlarının dışında, bir de üretim hızı parametresi şişe tasarımını etkilemektedir. Yapılan denemeler sonucunda silme hacminin üretim hızına etki ettiği tespit edilmiştir. 1064,16 ml ve 1114,16 ml'lik silme hacimleri üretim hızı için kritik değerlerdir. Yeni tasarlanan şişenin silme hacminin, mümkünse bu iki değer arasında olması istenmektedir. Bu durum da matematiksel modelde ayrıca dikkate alınmıştır. Bu bilgilere göre şişe tasarımı yapılırken üç farklı hedefe uygun şekilde karar vermek gerekmektedir. Bunlar:

-Aseptik dolun hattı en ve boy ölçü kısıtlarını aşmayan bir şişe tasarımı yapmak.

-Üretim hızını 18.000 şişe/saat ve 30.000 şişe/saat arasında tutabilmek için en az 1064,16 ml, en fazla 1114,16 ml silme hacme sahip şişe tasarımı yapmak.

-Müşterinin en fazla düzeyde beğenebileceği bir şişe tasarımı yapmak.

Görülüyor ki bu üç farklı hedefin özellikleri temel alındığında birbirinden farklı ve birbirinden bağımsız olmasına rağmen, aynı anda düşünülmesi gerekmektedir. Herhangi bir metot veya yaklaşım kullanmadan bu hedefleri en uygun şekilde sağlayabilen, ya da yakınsayabilen tasarımı yapmak oldukça zordur. Bu sebeple söz konusu hedeflere en uygun tasarımı elde edebilmek için 0-1 karma tam sayılı doğrusal olmayan bir hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Bu modelin amaç fonksiyonu bu üç hedefe de eşit oranda yakınsamayı temel almaktadır.

Geliştirilen hedef programlama modelinin amaç fonksiyonları tamamen 0-1 tam sayılı değişkenlerden oluşacak şekilde düzenlenmiştir. Bu karar değişkenleri birimlerden bağımsız olduğundan, birbirleriyle toplanma yoluna gidilmiştir. Amaç fonksiyonundaki tüm karar değişkenleri ilgili yerlerde sapma olup olmadığının birer göstergesi olarak düşünüldüğünden, matematiksel modelin amaç fonksiyonunun çözüm değeri sapma miktarını değil sapma sayısını göstermektedir. Bu durumu pratik olarak yorumlamak mümkün değilse bile, burada yapılan işlemin sapma sayısını en küçükleme olduğundan kısıtlardaki bağlantılı sapma değerlerini de mümkün olduğunca aşağı çekeceği söylenebilir. Geliştirilen 0-1 karma tam sayılı doğrusal olmayan hedef programlama modelinin amaç fonksiyonu ve kısıt denklemleri şöyledir:

$$Z_{enaz} = G_1 + G_2 + G_3 \quad (5)$$

$$G_1 - \sum_1^2 P_i^1 (y_i + z_i) = 0 \quad (6)$$

$$G_2 - (H_1 + H_2) = 0 \quad (7)$$

$$G_3 - \sum_1^4 P_i^3 (Sy_i^+ + Sy_i^-) = 0 \quad (8)$$

$$\Delta_i + Smax_i^- - Smax_i^+ = \Delta_i^+ \quad i=1,2 \quad (9)$$

$$\Delta_i + Smin_i^- - Smin_i^+ = \Delta_i^- \quad i=1,2 \quad (10)$$

$$Smax_i^+ - My_i \leq 0 \quad i=1,2 \quad (11)$$

$$Smax_i^+ - y_i \geq 0 \quad i=1,2 \quad (12)$$

$$Smin_i^- - Mz_i \leq 0 \quad i=1,2 \quad (13)$$

$$Smin_i^- - z_i \geq 0 \quad i=1,2 \quad (14)$$

$$\theta - \left( (0,5(77 + \Delta_2))^2 (\pi(45,3 + \Delta_1)) \right) - (\pi(1482,5)(45,3)) = 0 \quad (15)$$

$$\theta \leq 95500 \quad (16)$$

$$\theta \geq 0 \quad (17)$$

$$35660 - \theta - MH_1 \leq 0 \quad (18)$$

$$\theta - 85660 - MH_2 \leq 0 \quad (19)$$

$$\theta - S_1^+ = \Delta V_1 \quad (20)$$

$$\theta + S_{(i-1)}^- - S_i^+ = \Delta V_i \quad i=2,3,4 \quad (21)$$

$$\theta - S_4^- = \Delta V_5 \quad (22)$$

$$S_i^+ - MSy_i^+ \leq 0 \quad i=1,2,3,4 \quad (23)$$

$$S_i^- - MSy_i^- \leq 0 \quad i=1,2,3,4 \quad (24)$$

$$S_i^+, S_i^- \geq 0 \quad i=1,2,3,4 \quad (25)$$

$$Smax_i^+, Smax_i^-, Smin_i^+, Smin_i^- \geq 0 \quad i=1,2 \quad (26)$$

$$y_i, z_i, H_i, Sy_i^+, Sy_i^- \in \{0,1\} \quad i=1,2 \quad (27)$$

$$Sy_i^+, Sy_i^- \in \{0,1\} \quad i=1,2,3,4 \quad (28)$$

Geliştirilen matematiksel modeldeki değişken ve parametrelerin anlamları tüm detaylarıyla şöyledir:

$\Delta_1$ : Yeni şişe tasarımının boyunun eski şişe tasarımının boyundan farkı (serbest değişken)

$\Delta_2$ : Yeni şişe tasarımının çapının eski şişe tasarımının çapından farkı (serbest değişken)

$G_1$ : Yeni şişe tasarımının çap ve boy ölçülerine göre mevcut hatta yatırım yapılıp yapılmayacağını gösteren hedef #1

$G_2$ : Yeni şişe tasarımının aseptik dolum hattında 30.000 şişe/saat dolum hızının üzerinde ya da 18.000 şişe/saat dolum hızının altında çalışıp çalışmayacağını gösteren hedef #2

$G_3$ : Yeni şişe tasarımının silme hacmiyle ilişkili olarak müşteri beğenisinin belirlenen ifadelerden ağırlıklı sapma sayısını gösteren hedef #3

$\Delta_1^+$ : Hat spesifikasyonlarına göre yeni şişe tasarımının boyunda yapılabilecek en büyük artış

$\Delta_2^+$ : Hat spesifikasyonlarına göre yeni şişe tasarımının çapında yapılabilecek en büyük artış

$\Delta_1^-$ : Hat spesifikasyonlarına göre yeni şişe tasarımının boyunda yapılabilecek en büyük azalış

$\Delta_2^-$ : Hat spesifikasyonlarına göre yeni şişe tasarımının çapında yapılabilecek en büyük azalış

$Smax_i^-$ : Yeni şişe tasarımının boyundaki artışın olabilecek en büyük değerden negatif yönlü sapması

$Smax_i^+$ : Yeni şişe tasarımının boyundaki artışın olabilecek en büyük değerden pozitif yönlü sapması

$y_1 = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının boyundaki artış en büyük değerden pozitif yönlü saptıysa} \\ 0 & \text{Pozitif yönlü sapma yoksa} \end{cases}$

$Smin_i^-$ : Yeni şişe tasarımının boyundaki azalışın olabilecek en küçük değerden negatif yönlü sapması

$S_{min_1^+}$ : Yeni şişe tasarımının boyundaki azalışın olabilecek en küçük değerden pozitif yönlü sapması

$$z_1 = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının boyundaki azalış en küçük değerden negatif yönlü saptıysa} \\ 0 & \text{Negatif yönlü sapma yoksa} \end{cases}$$

$S_{max_2^-}$ : Yeni şişe tasarımının çapındaki artışın olabilecek en büyük değerden negatif yönlü sapması

$S_{max_2^+}$ : Yeni şişe tasarımının çapındaki artışın olabilecek en büyük değerden pozitif yönlü sapması

$$y_2 = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının çapındaki artış en büyük değerden pozitif yönlü saptıysa} \\ 0 & \text{Pozitif yönlü sapma yoksa} \end{cases}$$

$S_{min_2^-}$ : Yeni şişe tasarımının çapındaki azalışın olabilecek en küçük değerden negatif yönlü sapması

$S_{min_2^+}$ : Yeni şişe tasarımının çapındaki azalışın olabilecek en küçük değerden pozitif yönlü sapması

$$z_2 = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının çapındaki azalış en küçük değerden negatif yönlü saptıysa} \\ 0 & \text{negatif yönlü sapma yoksa} \end{cases}$$

$$H_1 = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının silme hacmi hattın hızını saatte 18.000 şişeye düşürüyorsa} \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$$H_2 = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının silme hacmi hattın hızını saatte 30.000 şişeye çıkarıyorsa} \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$S_1^+$ : Yeni şişe tasarımının 'orta' müşteri beğenisinin alt sınırından pozitif yönlü sapması

$$S_{y_1^+} = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının 'orta' müşteri beğenisinin alt sınırından pozitif yönlü saptıysa} \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$S_1^-$ : Yeni şişe tasarımının 'orta' müşteri beğenisinin üst sınırından negatif yönlü sapması

$$S_{y_1^-} = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının 'orta' müşteri beğenisinin üst sınırından negatif yönlü saptıysa} \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$S_2^+$ : Yeni şişe tasarımının 'çok' müşteri beğenisinin alt sınırından pozitif yönlü sapması

$$S_{y_2^+} = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının 'çok' müşteri beğenisinin alt sınırından pozitif yönlü saptıysa} \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$S_2^-$ : Yeni şişe tasarımının 'çok' müşteri beğenisinin üst sınırından negatif yönlü sapması

$$S_{y_2^-} = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının 'çok' müşteri beğenisinin üst sınırından negatif yönlü saptıysa} \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$S_3^+$ : Yeni şişe tasarımının 'az' müşteri beğenisinin alt sınırından pozitif yönlü sapması

$$S_{y_3^+} = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının 'az' müşteri beğenisinin alt sınırından pozitif yönlü saptıysa} \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$S_3^-$ : Yeni şişe tasarımının 'az' müşteri beğenisinin üst sınırından negatif yönlü sapması

$$S_{y_3^-} = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının 'az' müşteri beğenisinin üst sınırından negatif yönlü saptıysa} \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$S_4^+$ : Yeni şişe tasarımının 'çok az' müşteri beğenisinin alt sınırından pozitif yönlü sapması

$$S_{y_4^+} = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının 'çok az' müşteri beğenisinin alt sınırından pozitif yönlü saptıysa} \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$S_4^-$ : Yeni şişe tasarımının 'çok az' müşteri beğenisinin üst sınırından negatif yönlü sapması



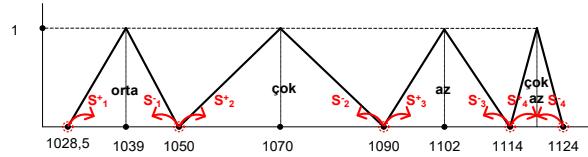
$$Sy_4^- = \begin{cases} 1 & \text{Yeni şişe tasarımının 'çok az' müşteri beğenisinin üst sınırından negatif yönlü saptıysa} \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$\Delta V_i$ : Silme hacim ve müşteri beğenisi arasındaki ilişkiyi temsil eden sınır değerler ( $i=1,2,3,4,5$ )

M: Yeterince büyük bir sayı

$\theta$ : Referans ve yeni tasarım şişelerin silme hacimleri arasındaki farkı gösteren değer

$S_1^+, S_1^-, S_2^+, S_2^-, S_3^+, S_3^-, S_4^+, S_4^-$  değişkenlerinin bulanık ifadeler üzerinden gösterimi Şekil 4'teki gibidir.



**Şekil 4.** Sapma değişkenlerinin üçgensel bulanık ifadeler üzerinde gösterimi (Representation of deviation variables on triangular fuzzy numbers)

Eşitlik 5 amaç fonksiyonu denklemdir ve Eşitlik 6, 7 ve 8'de ayrı ayrı yazılmış olan hedefleri enküçükler.  $G_1$  ile sembolize hedef, aseptik dolum hattında, dolumu yapılacak bir şişe tasarımının çap ve boy ölçülerine göre yeni yatırım yapılıp yapılmayacağını ağırlıklı olarak ifade eder. Buradaki  $y_1$  ve  $z_1$  değişkenleri diğer değişkenlere göre 0,5161 (1,18(56.775 )TL/1,18(110.000)TL) ile ağırlıklandırılmıştır. Çünkü  $y_1$  ve  $z_1$ 'in 1 değerini alması halinde yapılması gereken yatırım ile  $y_2$  ve  $z_2$ 'nin 1 değerini alması halinde yapılması gereken yatırım değerleri eşit değildir. Buna göre aralarında, yatırım oranlarına göre bir ağırlıklandırma söz konusudur.  $G_2$  ile sembolize edilen hedef, bir şişe tasarımının aseptik dolum hattında 30.000 şişe/saat dolum hızının üzerinde ya da 18.000 şişe/saat dolum hızının altında çalışıp çalışmayacağını ifade eder.  $G_3$  ile sembolize edilen hedef ise, bir şişenin silme hacmiyle ilişkili olarak müşteri beğenisinin belirlenen ifadelerden ağırlıklı sapma sayısını ifade eder. Burada bulanık olarak ifade edilen müşteri beğenileri, BAT tekniği kullanılarak durulaştırılmış ve elde edilen bilgi içerikleri matematiksel modelin amaç fonksiyonu ile zıt ilişkili olması sebebiyle, çarpmaya göre tersleri alınarak ilgili sapmaya bağlı 0-1 değişkenlere ağırlık olarak yazılmıştır.

Eşitlik 9, Eşitlik 14 ve arasındaki tüm eşitlikler de dâhil olmak üzere, yeni tasarımın ölçülerinin hat spesifikasyonlarının sınır değerlerini aşıp aşmama durumunu kontrol ederek birinci hedefin dikkate alınmasını sağlamaktadır. Eşitlik 15 referans ve yeni tasarım şişelerin silme hacimleri arasındaki farkın hesaplanmasını sağlamaktadır. Eşitlik 16 ve Eşitlik 17 silme hacminin 1028,5 ml'nin altında ve 1124 ml'nin üzerinde olmamasını sağlamaktadır. Eşitlik 18 ve eşitlik 19 yeni tasarımın silme hacimlerine göre hat hızının istenen sınırlar içerisinde kalıp kalmadığını bularak ikinci hedefin dikkate alınmasını sağlar. Eşitlik 20 ve eşitlik 24 arasındaki tüm eşitlikler dâhil olmak üzere, Şekil 4'te de ifade edilen müşteri beğenisinin silme hacimlere göre üçgensel sayılarla ifade edildiği her bir değerine göre yeni şişe tasarımının değerlendirilmesini ve üçüncü hedefin dikkate alınmasını sağlamaktadır.

Eşitlik 25, yeni şişe tasarımına ait silme hacim değerinin müşteri beğenisi ifadelerinin alt ve üst sınırlarından negatif ve pozitif sapmalarının sıfır veya sıfırdan büyük olmasını sağlamaktadır. Eşitlik 26, yeni şişe tasarımının boyundaki değişimin olabilecek en küçük veya en büyük değerlerden negatif ve pozitif yönlü sapmalarının sıfır veya sıfırdan büyük olmasını sağlamaktadır. Eşitlik 27 ve 28'de mevcut hattın kullanılabilmesi için belirlenen limitlerin aşılması ya da müşteri beğeni ifadesi sınırlarının aşılması gibi durumların tespit edilmesinin sağlayacak tüm ikili değişkenler tanımlanmıştır.

## 5. Araştırma Bulguları (Findings)

Geliştirilen 0-1 karma tam sayılı doğrusal olmayan hedef programlama modeli, verilen parametreler altında çalıştırıldığında elde edilen yeni şişe tasarımına ait değişim değerleri  $\Delta_1= 10,114$  mm,  $\Delta_2= 2,12$  mm bulunduğu için şişe boyu 293,614 mm, şişe taban çapı 79,12 mm ve Silme Hacim= 1090,002 ml olacaktır. Bu tasarım hem hat spesifikasyonlarına uygun, hem üretim hızı açısından istenilen niteliklere uygun hem de müşteri beğenisi olarak 'çok' olarak ifade edilen tanım aralığına uygundur.

Optimize edilen üç hedef birbirinden bağımsız olarak dikkate alındığında, geliştirilen modelin önereceği şişe tasarımlarının karşılaştırılması ile aradaki farklar da görülebilmektedir. Bu araştırma, istenilen ifadelerin, matematikselde modeldeki denklemlerle doğru temsil edilip edilmediklerini değerlendirmeye de olanak sağlayacaktır.

*Senaryo 1: Sadece hat spesifikasyonlarının dikkate alındığı durum*

Geliştirilen matematiksel modelde sadece hat spesifikasyonları dikkate alınır, yani sadece  $G_1$  hedefi enküçüklendiği takdirde (hat hızı ve müşteri beğenisi dikkate alınmaz ise) modelin amaç fonksiyon değeri Eşitlik 29'daki gibi olacaktır:

$$Z_{enaz} = \sum_1^2 P_1^1 (y_i + z_i) \quad (29)$$

Bunun yanı sıra Eşitlik 9 ve Eşitlik 17 ile bunların arasındaki tüm eşitlikler kullanılacaktır.

Sonuçta elde edilen yeni şişe tasarımına ait değişim değerleri  $\Delta_1= 1,235$  mm,  $\Delta_2= 1,235$  mm bulunduğu için şişe boyu 284,735 mm, şişe taban çapı 78,235 mm ve Silme Hacim= 1041,258 ml olacaktır. Bu durumda hat hızı 18.000 şişe/ saat'in altına düşecek ve silme hacme bağlı müşteri beğenisi de 'orta' olacaktır.

*Senaryo 2: Hat spesifikasyonlarının yanı sıra üretim hızının da dikkate alındığı durum*

Geliştirilen matematiksel modelde hat spesifikasyonlarının yanı sıra üretim hızı da dikkate alınır, yani  $G_1 + G_2$  hedefleri enküçüklendiği takdirde (müşteri beğenisi dikkate alınmaz ise) modelin amaç fonksiyon değeri Eşitlik 30'daki gibi olacaktır:

$$Z_{enaz} = \sum_1^2 P_1^1 (y_i + z_i) + (H_1 + H_2) \quad (30)$$

Bunun yanı sıra Eşitlik 9 ve Eşitlik 19 ile aradaki tüm eşitlikler kullanılacaktır.

Sonuçta elde edilen yeni şişe tasarımına ait değişim değerleri  $\Delta_1= 3,785$  mm,  $\Delta_2= 2,981$  mm bulunduğu için şişe boyu 287,285 mm, şişe taban çapı 79,981 mm ve Silme Hacim= 1064,16 ml olacaktır. Bu durumda hat hızı 18.000 şişe/ saat'in altına düşmeyecek ve silme hacme bağlı müşteri beğenisi de 'çok' olacaktır. Burada müşteri beğenisinin artması, hız kısıtının alt sınırının müşteri beğenisinin 'çok' olduğu tanım aralığında olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç yorumlandığında iyi bir çözüm elde edildiği söylenebilir.

*Senaryo 3: Hat spesifikasyonlarının yanı sıra müşteri beğenisinin de dikkate alındığı durum*

Geliştirilen matematiksel modelde hat spesifikasyonlarının yanı sıra müşteri beğenisi de dikkate alınır, yani  $G_1 + G_3$  hedefleri enküçüklendiği takdirde (hat üretim hızı dikkate alınmaz ise) modelin amaç fonksiyon değeri Eşitlik 31'deki gibi olacaktır:

$$Z_{enaz} = \sum_1^2 P_1^1 (y_i + z_i) + \sum_1^4 P_1^3 (Sy_1^+ + Sy_1^-) \quad (31)$$

Bunun yanı sıra, Eşitlik 9 ve Eşitlik 17 ile bunların arasındaki tüm eşitlikler ve Eşitlik 20 ve Eşitlik 24 ile bunların arasındaki tüm eşitlikler kullanılacaktır.

Sonuçta elde edilen yeni şişe tasarımına ait değişim değerleri  $\Delta_1= 10,114$  mm,  $\Delta_2=2,12$  mm bulunduğu için şişe boyu 293,614 mm, şişe taban çapı 79,12 mm ve Silme Hacim= 1090,002 ml olacaktır. Bu tasarım parametreleri tüm hedeflerin birlikte sağlandığı matematiksel modelin ürettiği tasarım parametreleri ile aynıdır. Hem hat spesifikasyonlarına uygun, hem üretim hızı açısından istenilen niteliklere uygun hem de müşteri beğenisinin 'çok' olarak ifade edilen tanım aralığına uygundur. Hedefler üzerinde geliştirilen tüm senaryolardan elde edilen sonuçlar Tablo 5'te özetlenmiştir.

**Tablo 5.** Tüm senaryolardan elde edilen sonuçlar (Results from all scenarios)

	Şişe Boyu (mm)	Taban Çapı (mm)	Silme Hacim (ml)	Yorum
<b>Tüm Hedefler:</b> $Z_{enaz}=G_1+G_2+G_3$	293,614	79,12	1090,002	Hat Spesifikasyonları: Uygun Üretim Hızı: 18.000-30.000 Müşteri Beğenisi: Çok
<b>Senaryo 1:</b> $Z_{enaz}=G_1$	284,735	78,235	1041,258	Hat Spesifikasyonları: Uygun Üretim Hızı: 18.000 altı Müşteri Beğenisi: Orta
<b>Senaryo 2:</b> $Z_{enaz}= G_1+G_2$	287,285	79,981	1064,16	Hat Spesifikasyonları: Uygun Üretim Hızı: 18.000-30.000 Müşteri Beğenisi: Çok
<b>Senaryo 3:</b> $Z_{enaz}= G_1+G_3$	293,614	79,12	1090,002	Hat Spesifikasyonları: Uygun Üretim Hızı: 18.000-30.000 Müşteri Beğenisi: Çok

Sonuç olarak Senaryo 3'de elde edilen şişe tasarım parametreleri ile tüm hedeflerin düşünülerek elde edilen tasarım parametreleri aynı bulunmuştur. Bunun sebebi müşteri beğenisini sağlayan girdilerin aynı zamanda istenen üretim hattı hızı girdilerini sağlamasıdır. Bu durumun tersinin de mümkün olduğunu Senaryo 2'de görmekteyiz.

## 6. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada içecek sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin şişe tasarımı problemi ele alınmıştır. Ele alınan tasarım probleminde birden fazla hedefin bir arada düşünülmesi gerektiğinden nihai çözüm için hedef programlama yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu hedefler üretim hattı spesifikasyonlarının değişmemesi, üretim hızının belirli bir seviyede tutulması ve mümkün olan en yüksek müşteri beğenisinin sağlanması olarak belirlenmiştir. İnsanın doğal karar verme süreçlerini daha iyi ifade edebilmesi bakımından müşteri beğenisi hedefi bulanık veriler altında dikkate alınmıştır. Bulanık veriler, hedef programlama modelinde kullanılmadan önce literatürde ürün ve sistem tasarımı problemlerinin çözümü için sıklıkla tercih edilen AT tekniğinden türetilmiş olan BAT tekniği ile durulaştırılmıştır. Özetlemek gerekirse bu çalışmada, müşteri beğenisi hedefine ait bulanık veriler BAT ile durulaştırıldıktan sonra, üretim hızı ve üretim hattı spesifikasyonları hedefleri ile bir arada bir 0-1 karma tam sayılı bir doğrusal olmayan hedef programlama modeli üzerinden değerlendirilerek şişe tasarım problemi çözülmüştür. Ürün tasarımı problemi için AT ve hedef programlama yaklaşımlarının ayrı ayrı kullanıldığı çalışmalara literatürde rastlamak mümkün olsa da, bu çalışmada birlikte kullanılan BAT ve hedef programlama yöntemlerinin literatürde daha önce hiç birlikte kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu açıdan çalışma, ürün tasarımı probleminin ele alınışı ve çözümüyle farklı bir bakış açısı ve literatüre katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmanın motivasyonunu oluşturan içecek sektöründe faaliyet gösteren firmanın, dışarıya fason olarak üreteceği, sonrasında seri üretime devam edip etmeyeceği belli olmayan yeni bir ürün için karşı karşıya kaldığı şişe tasarım problemi başarılı bir şekilde çözülerek proje en düşük maliyetle tamamlanmıştır. Önerilen çözüm sonucunda hat spesifikasyonları değişim maliyetlerinden kurtulmanın yanı sıra, klasik deneme yanılma yönteminden kaynaklanabilecek tekrarların sonucunda doğabilecek motivasyon, zaman, iş gücü kaybı, preform maliyeti, deneme kalıbı maliyeti, vs. gibi tüm detay maliyetlerden de kaçınılmıştır. Sonuç olarak verilen üretim hızını istenen ölçüde tutabilecek, üretim hattı spesifikasyonlarını sağlayan ve müşteri beğenisini de 'çok' ifadesi ile sağlayabilen 1090,002 ml'lik silme hacimdeki şişe tasarımı elde edilerek üretim hattında deneme yapılmış ve tasarım yetkililerden onay almıştır.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Beng, L. G., Omar, B., 2014. Integrating Axiomatic Design Principles into Sustainable Product Development. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1(2),107-117.
- Büyüközkan, G., Berkol, Ç., 2011. Designing A Sustainable Supply Chain Using An Integrated Analytic Network Process and Goal Programming Approach in Quality Function Deployment. *Expert Systems with Applications*, 38, 13731-13748.
- Cavique, M., Gonçalves-Coelho, A. M., 2009. Axiomatic Design and HVAC Systems: An Efficient Design Decision-Making Criterion. *Energy and Buildings*, 41, 146-153.
- Helander, M. G., Lin, L., 2002. Axiomatic Design in Ergonomics and An Extension of The Information Axiom. *Journal of Engineering Design*,13(4), 321-339.
- Houshmand, M., Jamshidnezhad, B., 2006. An Extended Model of Design Process of Lean Production Systems by Means of Process Variables. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22, 1-16.
- Jang, B. S., Yang, Y. S., Song, Y. S., Yeun, Y. S., Heedo, S., 2002. Axiomatic Design Approach for Marine Design Problems. *Marine Structures*, 15, 35-56.
- Janthong, N., Brissaud, D., Butdee, S., 2010. Combining Axiomatic Design and Case-Based Reasoning in An Innovative Design Methodology of Mechatronics Products. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2, 226-239.
- Karsak, E. E., Sozer, S., Alptekin, S. E., 2003. Product Planning in Quality Fuction Deoployment Using A Combined Analytic Network Process and Goal Programming Approach. *Computers & Industrial Engineering*, 44(1), 171-190.
- Kim, Y., 2004. A Decomposition Based Approach to Integrate Product Design and Manufacturing System Design. *Proceeding of Third International Conference on Axiomatic Design*, June 11 - 24, Seul.
- Kulak, O., Kahraman, C., 2005a. Multi-Attribute Comparison of Advanced Manufacturing Systems Using Fuzzy vs. Crisp Axiomatic Design Approach, *International Journal of Production Economics*, 95, 415-424.
- Kulak, O., Kahraman, C., 2005b. Fuzzy Multi-Attribute Selection Among Transportation Companies Using Axiomatic Design and Analytic Hierarchy Process. *Information Science*, 170, 191-210.
- Lee, J., Shin, H., 2008. Parameter Design of Water Jet Nozzle Utilizing Independence Axiom. *Journal of Process Mechanical Engineering Part E*, 202, 157-168.

- Lee, K. D., Suh, N. P., Oh, S.-H., 2001. Axiomatic Design of Machine Control Systems. *Annals of the CRIP*, 50(1), 109-114.
- Lu, R.-J., Feng, Y.-X., Zheng, H., Tan, J.-R., 2016. A Product Design Based on Interaction Design and Axiomatic Design Theory. *10th International Conference on Axiomatic Design (ICAD'16)*, 53, 125-129.
- Brandenburg, M., 2015. Low Carbon Supply Chain Configuration for a New Product – A Goal Programming Approach. *International Journal of Production Research*, 53(21), 6588-6610.
- Suh, N. P., 1990. *The Principles of Design*. Oxford University Press, New York, 67-90.
- Tyagi, S., Yang, K., Tyagi, A., Verma, A., 2012. A Fuzzy Goal Programming Approach for Optimal Product Family Design of Mobile Phones and Multiple-Platform Architecture. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, 42(6), 1519-1530.



## YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ELEKTROSTATİK LENS SİSTEM TASARIMI

Nimet IŞIK<sup>1\*</sup>, Ali Hakan IŞIK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Burdur, Türkiye

<sup>2</sup> Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Elektrostatik Lensler,  
Paralel Elektron Demeti,  
Yapay Sinir Ağları.*

### Öz

Yapay zekâ algoritmalarıyla son yıllarda birçok bilim dalında başarılı uygulamalar geliştirilmektedir. Deneysel veya benzetim programlarından elde edilen veriler söz konusu algoritmalarla işlenmektedir. Tasarlanan algoritma mimarileri ile veriler işlenerek tahmin ve sınıflandırma çalışmaları yapılmaktadır. Bu algoritmalar, amaca ve veri kümesine uygun olan algoritmanın seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, fizik alanındaki yenilikçi çalışmalarda yapay sinir ağı algoritması kullanmak yüksek performans değerleri elde etmeyi sağlamaktadır. Biyolojik nöronlardan esinlenen yapay sinir ağı (YSA), öğrenme yeteneğine sahip paralel hesaplama sistemidir. Bu çalışmada, üç katmanlı yapay sinir ağı kullanılarak beş elemanlı elektrostatik silindirik lenslerin paralel demet modu belirlenmektedir. Çalışmada kullanılan veri kümesi, yüksek doğrulukta hesaplama yapabilen CPO(Yüklü Parçacık Optiği) programı yardımıyla elde edilmiştir. Verilerin analizi Matlab R2012b programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yapay sinir ağının fizik alanında paralel demet modunu belirlemede yüksek performans değerlerine sahip olan ve elektrostatik problem çözümlerinde sonlu fark ve sınır eleman metoduna alternatif bir metot olduğu ortaya konulmuştur. Oluşturulan YSA algoritması, test verilerinin %85,7'sini doğru olarak sınıflandırmıştır.

## ELECTROSTATIC LENS SYSTEM DESIGN WITH THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

### Keywords

*Electrostatic Lenses,  
Parallel Electron Beam,  
Artificial Neural Networks.*

### Abstract

Successful applications have been developed in many disciplines with artificial algorithms in recent years. The data obtained from experimental or simulation programs have been processed with the corresponding algorithms. Prediction and classification studies are carried out by processing the data with the designed algorithm architectures. From these algorithms, it is of great importance to select the algorithm that is appropriate for the purpose and data set. In this context, using artificial neural network algorithms in innovative studies in the field of physics ensures high performance values. Artificial neural network (ANN), inspired by biological neurons, is parallel computing system having learning ability. In this study, the parallel beam mode of the five-element electrostatic cylindrical lenses is determined using a three layer artificial neural network. The data set used in the study was obtained with the aid of the CPO (Charged Particle Optics) program enabling highly accurate calculation. Analysis of the data was performed using Matlab R2012b program. According to the obtained results, it has been revealed that the artificial neural network has high performance values in determining the parallel beam mode in the field of physics and it is an alternative method to the finite difference and boundary element method in electrostatic problem solutions. The generated YSA algorithm correctly classifies 85.7% of the test data.

\* İlgili yazar / Corresponding author: nokumus@mehmetakif.edu.tr, +90-248-213-4023

**Alıntı / Cite**

Işık, N., Işık, A. H., (2020). Yapay Sinir Ağları İle Elektrostatik Lens Sistem Tasarımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 388-396.

**Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)**

N. Işık, 0000-0002-1347-6628

A. H. Işık, 0000-0003-3561-9375

**Makale Süreci / Article Process**

**Başvuru Tarihi / Submission Date** 16.05.2019

**Revizyon Tarihi / Revision Date** 16.04.2020

**Kabul Tarihi / Accepted Date** 06.05.2020

**Yayın Tarihi / Published Date** 25.06.2020

**1. Giriş (Introduction)**

Elektronların atom ve moleküller ile çarpışma deneyleri, kuantum parçacıklar arasındaki temel etkileşimleri belirlemede önemli rol oynamaktadır (Al-Hagan vd., 2009). Bu deneylerdeki hedef atom ya da molekül, çarpışma bölgesinde paralel elektron demeti ile dik olarak kesişmektedir (Sise vd., 2009; Işık vd., 2016). Çarpışma sonrası saçılan elektronların ölçülmesiyle, çarpışma dinamiği hakkında bilgi elde edilmektedir (Lahmam-Bennani, 1991). Söz konusu deneylerde, araştırma süresince paralel elektron demeti elde etmek önemlidir. Elektrostatik lenslere uygulanan farklı voltajlar sayesinde, deneylerde istenilen çapta elektron demeti elde edilebilmektedir. Deneysel araştırma öncesi, lens sistemlerinin optimizasyonu ile istenilen çapta paralel demet elde edilmesini sağlayan lens voltajlarının belirlenmesi gerekmektedir.

Yapay zekâ teknolojileri fiziğin birçok alanında olduğu gibi (Sumpter vd., 1992; Sigman ve Rives, 1994; Lagaris vd., 1997; Khan vd., 2001; Bayram vd., 2014), son yıllarda elektrostatik lens tasarımında da kullanılmaktadır (Weng vd., 1991; Tam vd., 2000; Nouri ve Pierre-Jean, 1992; Petkovic vd., 2014; Işık, 2015a; Işık, 2015b; Işık, 2016; Işık ve Işık, 2016a; Işık ve Işık, 2016b). Yapay zekâ metodlarından biri olan yapay sinir ağları metodu, insan beyninden esinlenerek ortaya çıkan bir metottur. Yapay sinir ağları, girilen örneklerden bilgiler toplayarak, bu bilgiler yardımıyla genellemeler yapabilmektedir. Eğitilen YSA algoritması, genelleme yapabilme ve öğrenebilme yeteneği sayesinde daha önceden görmediği örnekler hakkında karar verebilmektedir. Deneysel çalışmalardan önce, elektrostatik lens sistemlerinin optimizasyonuna yardımcı olacak alternatif ve etkin bir çözüm olarak, YSA algoritması, ilk olarak 2015'de üç-elemanlı lenslerin odaklama voltaj değerlerinin sınıflandırılması amacıyla kullanılması önerilmiştir (Işık, 2015a). Öncü bir çalışmanın ardından, yüksek doğrulukta elde edilen sonuçlar, uygun mimaride oluşturulan ve eğitilen YSA algoritmalarının sınıflandırma özelliğinin aperture lens sistemlerinde (Işık, 2016) ve çarpışma deneylerinde sıklıkla kullanılan elektron tabancalarında (Işık ve Işık, 2016a) da başarısını göstermektedir. Bu çalışmaların devamı niteliğinde gerçekleştirilen bu çalışmada ise, paralel demet elde etmek için en uygun değerde elektrostatik lens voltajlarını araştırmada yapay sinir ağı algoritması kullanılmıştır. Elektron-atom/molekül çarpışma deneyleri başta olmak üzere çoğu deneysel çalışmalarda etkileşme bölgesinde elektron ya da yüklü parçacık demetinin paralel ve belirli bir çapta olması istenmektedir. Paralel demet elde etmek için, lenslere uygulanacak voltaj değerleri belirlenmelidir. Bu amaç ile elektrostatik problemlerde çözümler veren SIMION ve CPO simülasyon programları kullanılmaktadır (Sise vd., 2009). Fakat bu programlar yardımıyla verileri elde etmek için sistem tasarımı yapılmak zorundadır. Tasarımı yapılan sistem içinde yüklü parçacığın yörüngesi her bir voltaj değeri için hesaplanmalıdır. Bu durum, zaman ve emek kaybına neden olmaktadır. Bununla beraber, paralel demet modunu veren voltaj değerlerinin saptanmasında, hızlı çözümler üretebilen yapay sinir ağları uygulaması kaynakçada bulunmamaktadır. Bu nedenle, kaynakçadaki eksikliği tamamlayacak olan bu çalışmada, uygun eğitim veri kümesiyle eğitilen YSA algoritmasının analiz sonuçları verilmiştir. Yapay sinir ağı algoritmasının eğitimi ve testi için sınır eleman metodunu (BEM) kullanan CPO programından giriş-çıkış veri kümesi elde edilmiştir (Heddle, 2000; Read ve Bowring, 2011). BEM, kısmi diferansiyel denklemler ile sınır değer problemlerinin analizinde kullanılan sayısal bir hesaplama yöntemidir. Çalışmada önerilen yapay sinir ağı, etkileşim bölgesinde paralel ve paralel olmayan elektron demeti elde eden lens voltajlarını yüksek doğrulukta sınıflandırmaktadır.

Bu çalışma, dört temel bölümden oluşmaktadır. İkinci bölüm, YSA algoritmasının eğitimi ve testinde kullanılan veri kümesinin hesaplama yöntemi ve YSA algoritması hakkında ayrıntılı bir bilgi içermektedir. Üçüncü bölümde ise, oluşturulan YSA mimarisinin verileri sınıflandırmadaki performans sonuçları verilmektedir. Dördüncü bölümde ise, elde edilen sonuçlar ve araştırmanın geliştirilmesine yönelik gelecekte yapılabilecek çalışmalar değerlendirilmiştir.

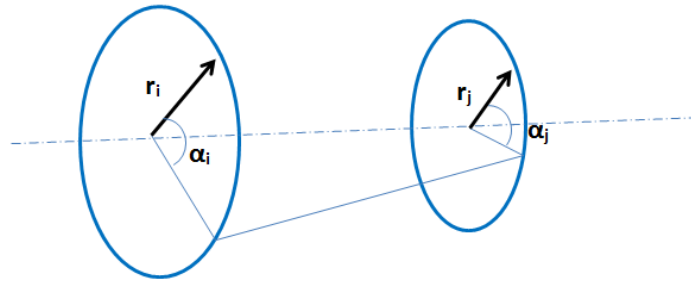
## 2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

### 2.1. Sınır Eleman Metodu (Boundary Element Method (BEM))

Elektrostatik bir alanda yüklü parçacıkların hareketi, Laplace denkleminin uygun birtakım sınır şartlarında çözümü ile elde edilmektedir (Hedde, 2000).  $V$ , elektrostatik lens potansiyeli olmak üzere, polar koordinatlar kullanılarak Laplace denklemi,

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \quad (1)$$

olarak yazılmaktadır. Laplace denklem çözümünde, sınır eleman metodu, eksensel simetrik lensler arasında hareket eden elektron demetinin yörüngesini yüksek doğrulukta hesaplayabilmektedir (Harting ve Read, 1976). Sınır eleman metodunda her bir elektrot, elektrot yüzeyindeki yükler sistemi ile temsil edilebilmektedir (Read vd., 1971; Cubric vd., 1999). Şekil 1'de gösterildiği gibi,  $r(j)$  yarıçaplı halkanın yüküne göre,  $r(i)$  yarıçaplı halkanın potansiyeli bulunarak, elektrot potansiyeli bulunabilmektedir.



**Şekil 1:** Sınır eleman metodunda, bir yük halkasına göre, belirli bir noktanın potansiyelini hesaplamasında koordinatları belirtmek için elde edilen diyagram. (In the boundary element method, a diagram obtained to specify coordinates in calculating the potential of a particular point according to a load ring)

$V_k$ ,  $n$  elektrodun herbiri üzerinde  $r_j$  konumlarındaki  $q_j = \sigma_j dS_j$  yüklerine göre  $r_k$  konumundaki potansiyeli temsil etmek üzere;

$$V_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^n \int_{S_j} \frac{\sigma_j r_j dS_j}{|r_j - r_k|} \quad (2)$$

denklemi eksensel simetri göz önüne alınarak çözülmektedir (Hedde, 2000). Bu çalışmada, YSA eğitiminde kullanılan veri kümesi, sınır eleman metodu kullanılarak elde edilmiştir.

### 2.2. Yapay Sinir Ağı Algoritması (Artificial Neural Network Algorithm)

İnsan beyninin fonksiyonlarını taklit ederek, insan zihninin öğrenebilme ve öğrenilen bilgidan çıkarımda bulunabilme yeteneklerinin bilgisayar ortamında uygulanması, yapay zekâ uygulamaları olarak nitelendirilmektedir. Yapay zekâ algoritmalarının alt dallarından olan yapay sinir ağı, doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapay sinir ağı, örnek veri kümesi aracılığıyla, biyolojik sinir sisteminin çalışmasını taklit eden bilgi işleme sistemidir. Bu sistemler, sinir hücrelerinin benzetildiği nöronlardan oluşur. Nöronların her biri farklı şekillerde birbirlerine bağlanmasıyla ağ mimarisi oluşmaktadır. Girilen girdi-çıkı veri kümesi aracılığıyla, bu ağ veriler arasındaki ilişkiyi öğrenebilmekte ve hafızaya alabilmektedir. Öğrenme yeteneği sayesinde, daha önceden ağ tarafından bilinmeyen veri için uygun çıktıyı üretebilmektedir. Bu durum, performans analiz yöntemleriyle araştırılmaktadır. Yapay sinir ağı, eksik bilgilerle çalışabilme ve girilen verilere göre çözüm üretebilme yeteneklerinden dolayı farklı alanlarda kullanılabilir. Yapılan çalışmada, beş elemanlı silindirik elektrostatik lens sistemlerinde voltaj oranlarına bağlı demet çapının belirlenmesinde YSA algoritması kullanılmıştır. Böylece, YSA algoritması sayesinde elektron demet çapının odaksız ya da paralel olup olmadığı belirlenmiştir.

Sınıflandırma sonuçlarının performansının değerlendirilmesinde, karışıklık matrisi (confusion matrix), regresyon analizi (ROC eğrisi) ve hata histogramı kullanılmıştır. Karışıklık matrisinde, doğruluk oranı (accuracy), duyarlılık (sensitivity), belirlilik (specificity), parametreleri, oluşturulan YSA mimarisinin performansını değerlendirmede kullanılmıştır. Söz konusu performans ölçüm parametrelerinden belirlilik oranı değeri, bir testin gerçekten ilgili sınıfa ait olmayanları ayırt edebilme kabiliyetini belirlemeyi sağlayan değerdir. DN=Doğru Negatif, DP=Doğru Pozitif, YN=Yanlış Negatif, YP=Yanlış Pozitif, N=Negatif, P=Pozitif olmak üzere belirlilik değeri,

$$\text{Belirlilik} = \text{DN} / (\text{DN} + \text{YP}) \quad (3)$$

denklemi ile bulunmaktadır. Duyarlılık oranı değeri, ilgili sınıfa ait olanların test tarafından hangi değerde belirlenebildiğini bulan değerdir. Duyarlılık oranı değeri,

$$\text{Duyarlılık} = \text{DP} / (\text{DP} + \text{YN}) \quad (4)$$

olarak hesaplanmaktadır. Doğruluk oranı değeri, bir testin ilgili sınıfa ait olanları söz konusu sınıfta bulan, ilgili sınıfa ait olmayanları söz konusu sınıfta olmadığını bulan sınıflandırma oranıdır ve bir testin performans amaçlı ne kadar güvenilir olduğunu belirler. Doğruluk oranı,

$$\text{Doğruluk} = (\text{DP} + \text{DN}) / (\text{DP} + \text{YP} + \text{DN} + \text{YN}) \quad (5)$$

ile hesaplanmaktadır. Tablo 1’de karışıklık matrisi analizi gösterilmektedir.

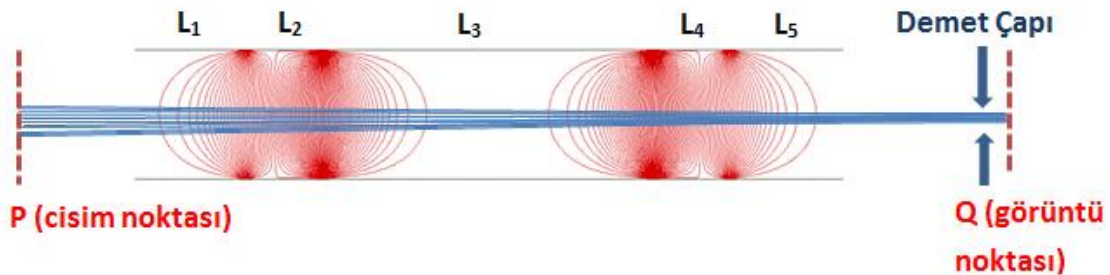
**Tablo 1:** Karışıklık matrisinde belirlilik, duyarlılık ve doğruluk oranı değerlerinin görünümü. (Specificity, sensitivity and accuracy values in the confusion matrix)

		Öngörülen Sınıf		
		P	N	
Gerçek Sınıf	P	DP	YP	
	N	YN	DN	
		Duyarlılık	Belirlilik	Doğruluk

Ayrıca ROC eğrisi ile değişken parametrelerden herhangi birinin belirli bir birim değiştiğinde, diğer parametrenin nasıl bir değişim gösterdiği incelenebilmektedir. ROC eğrileri, uygun kesim noktalarının oluşturulan sınıflandırma çizelgelerindeki belirlilik ve duyarlılık değerlerine bakılarak oluşturulurlar. ROC eğrisi içinde kalan alan testin başarısını ifade etmekte kullanılır. ROC eğrisi, duyarlık oranı eksenine ile belirlilik oranı eksenine arasında gösterilir (Haykin, 1999). Hata histogramı ise, sınıflandırmanın hata oranını ve sınıflandırmada yapılan sapmaları açık bir şekilde göstermektedir.

#### 4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Bu çalışmada, ileri beslemeli geri yayılım yapay sinir ağı algoritması, beş elemanlı silindirik lens sistemlerinin paralel demet modunu sınıflandırmak için kullanılmıştır. Yapay sinir ağı eğitiminde yüksek doğrulukta sonuçlar veren ve sınır eleman metodu ile hesaplamalar yapan CPO programı kullanılmıştır. Sonlu fark ve sonlu eleman metodlarından yaklaşık 100 kat daha doğru sonuçlar veren sınır eleman metodu, deneysel sistemlerde yer alan elektrostatik lens sistemlerinin optiksel parametrelerinin optimizasyonunda daha yakın değerler vermesi açısından tercih edilmektedir. Elektrostatik lens sistem tasarımı D=100 mm olarak alınmıştır. P/D=5 cisim noktasından gönderilen elektron demetinin, Q/D=5 görüntü noktasında oluşturduğu demet çapı hesaplanarak eğitim veri kümesi oluşturulmuştur. Oluşturulan beş-elemanlı elektrostatik lens sistemi ve lensler arasındaki eş potansiyel yüzeylerin şematik görünümü Şekil 2’de verilmektedir.

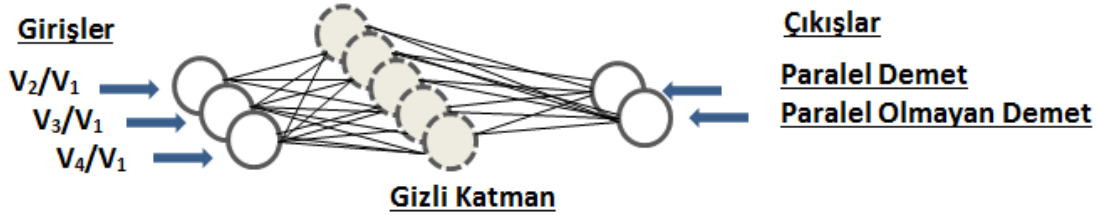


**Şekil 2:** Beş-elemanlı elektrostatik lens sisteminin şematik görünümü. L(i), potansiyel uygulanan elektrostatik silindirik lensleri sırasıyla göstermektedir. (Schematic view of the five-element electrostatic lens system. L (i) shows potential applied electrostatic cylinder lenses respectively)

Elektrostatik lenslerin potansiyel değerlerine bakıldığında,  $V_5/V_1=1$  olarak alınırken  $V_4/V_1$ ,  $V_3/V_1$  ve  $V_2/V_1$  değerleri giriş veri kümesi olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçların geniş bir çalışma aralığında kullanılabilmesi amacıyla, her bir lens elemanının voltaj değeri ilk lens elemanı voltaj değerine göre oransal olarak alınmıştır. Sınır eleman metodu kullanılarak hesaplanan büyütme değerleri ise, ağ çıkış veri kümesinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Görüntü noktasında, 0,4 mm.- 2 mm. yarıçaplı elektron demetleri, “paralel elektron demeti” olarak



tanımlanmıştır. Bir diğer ifadeyle, cisim noktasından gönderilen elektron demet çapına bağlı olarak, görüntü noktasında büyütmenin "1" olduğu değerler paralel elektron demeti olarak tanımlanmıştır. Farklı voltaj değerleri uygulanan elektrostatik lens bölgesinden geçen elektron demetinin görüntü noktasında oluşturduğu paralel elektron demeti [1 0] olarak kodlanmıştır.  $Q/D=5$  görüntü noktasında paralel olmayan elektron demeti ise [0 1] olarak kodlanarak çıkış veri kümesini oluşturmuştur. Ağın genel görünüşü Şekil 3'de verilmektedir. Beş elemanlı lens sisteminin  $V_4/V_1$ ,  $V_3/V_1$  ve  $V_2/V_1$  voltajları giriş verilerini oluştururken, çıkışta elektron demetinin yarıçap değerine bağlı olarak paralel ya da paralel olmayan demet modu ağ tarafından sınıflandırılmaktadır.

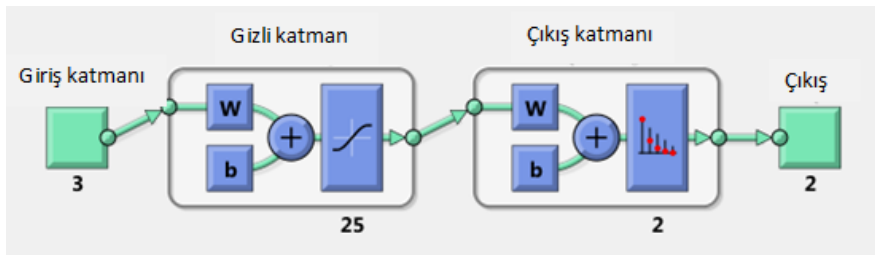


Şekil 3: Beş-elemanlı silindir lens sistemleri için oluşturulan YSA mimarisinin şematik görünümü. (Schematic view of ANN architecture created for five-element cylinder lens systems)

Bu çalışmada YSA algoritmasının uygulanması ve performans analizi, Matlab R2012b programı ile gerçekleştirilmiştir. Performans değerlerini geliştirmek için, giriş verilerine [0 1] aralığına ölçekleme olan (Min-Max) normalizasyonu yapılmıştır. CPO yazılımından elde edilen ve YSA eğitiminde kullanılan 50 adet giriş ve çıkış verilerinin, %50'si eğitim, %15'i doğrulama ve %35'i test veri kümesi olarak kullanılmıştır. Gizli katman ve çıkış katmanının her ikisinde de en iyi sonucu veren, tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu ( $2/(1+e^{-2x}) - 1$ ) kullanılmıştır. Eğitim aşamasında, en yüksek doğrulukta sonuçlar veren Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması kullanılmıştır (Marquardt, 1963; Levenberg, 1944). Ağın giriş ve çıkış verileri arasındaki ilişkiyi ezberlemeden öğrenmesi ve yüksek doğrulukta sonuçlar vermesi açısından, en iyi sınıflandırma elde edilene kadar gizli katman nöron sayısı değiştirilmiştir. 25 gizli katman nöron sayısı ile en iyi değere ulaşılmıştır. YSA'nın en yüksek performans değerini elde etmek için öğrenme katsayısı ve momentum değerleri deneme-yanılma yöntemiyle bulunmuştur.

Performans analizi, karışıklık matrisi, ROC eğrisi ve hata histogramının çözümlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Alınan sonuçlara göre, paralel elektron demeti modunda oluşturulan lens voltajlarının sınıflandırılmasının, beş-elemanlı silindir lens sistemi için 3-25-2 YSA mimarisi en yüksek performansa sahiptir (Şekil 4). Oluşturulan YSA mimarisinin sınıflandırma başarısını göstermekte kullanılan ölçütlerden belirlilik, duyarlılık ve doğruluk ölçütleri kullanılmıştır. Tablo 2'de farklı nöron sayılarına sahip YSA mimarilerinin test veri kümesi için performans sonuçları verilmektedir.

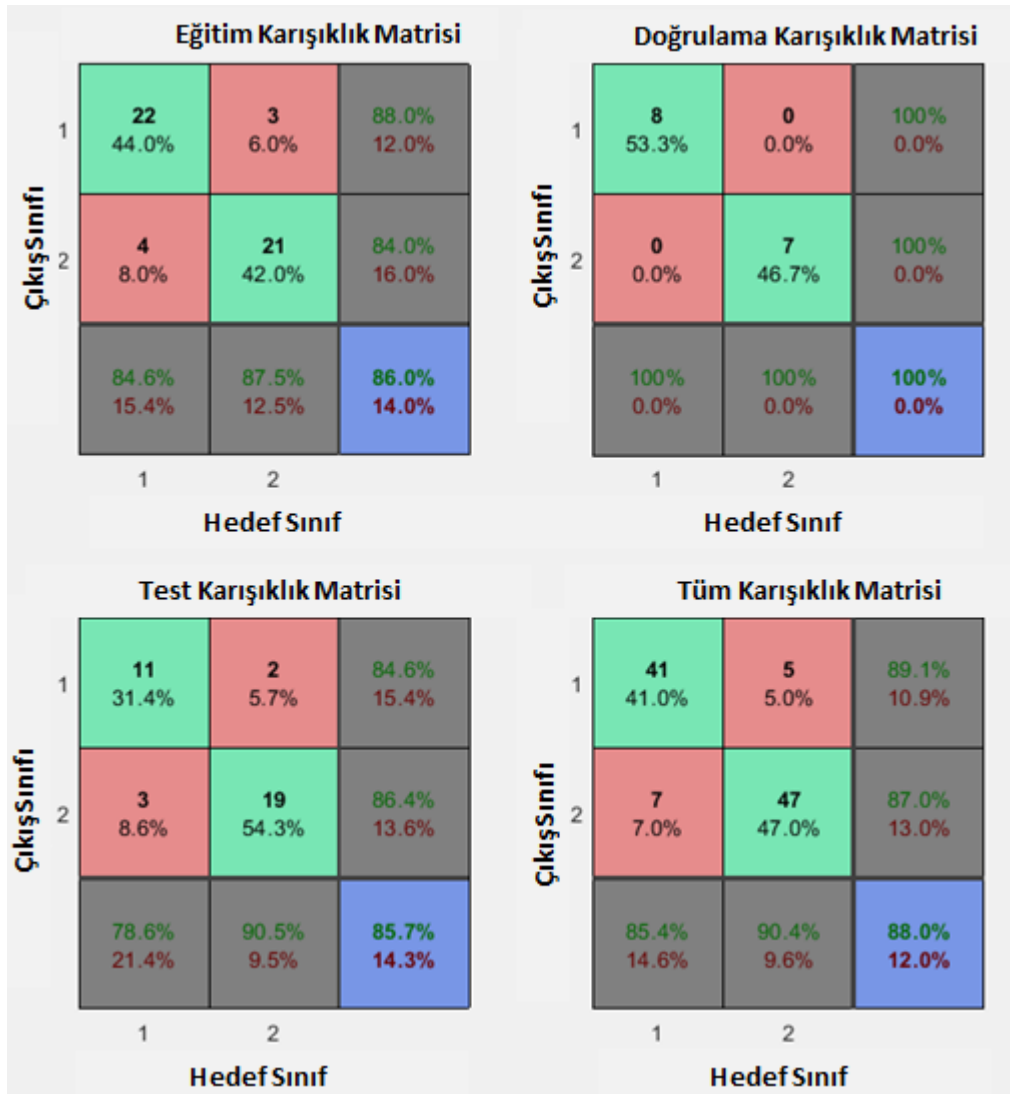
En iyi sonucu veren 3-25-2 YSA mimarisine ait performans sonuçları şekil 5'de verilmiştir. Sırasıyla ağın eğitim, doğrulama, test ve tüm sonuçlarının sergilendiği karışıklık matrisi şekil 5'de verilmektedir. Test sonuçlarına bakıldığında, ağın daha önceden görmediği verilerin % 85,7'sini doğrulukla sınıflandırdığı bulunmuştur. Test karışıklık matrisinde, doğru olarak sınıflandırılan ve DP ve DN olarak tanımlanan verilerin sayısı sırasıyla 11 ve 19 olmuştur. Diğer yandan, ağın daha önceden görmediği test verilerinden doğru sonuç bulunamayan, YP ve YN olarak tanımlanan verilerin sayısı sırasıyla 2 ve 3 olarak bulunmuştur. Böylece, ağın test verilerini sınıflandırmasında doğruluk oranı, denklem (5) yardımıyla %85,7 olarak bulunmuştur. Ağın test verilerini sınıflandırmasında duyarlılık oranı, denklem (4) yardımıyla %78,6 olarak bulunmuştur. Test verilerinde belirlilik oranı ise, denklem (3) yardımıyla, %90,5 olarak bulunmuştur.



Şekil 4: En iyi sınıflandırma yeteneğine sahip 3-25-2 YSA mimarisinin şematik gösterimi. Gizli katmanda tanjant sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. w ağırlık vektörünü, b ise eşik değerini gösterir. (Schematic representation of 3-25-2 ANN architecture with the best classification capability. w indicates the weight vector and b indicates the threshold value)

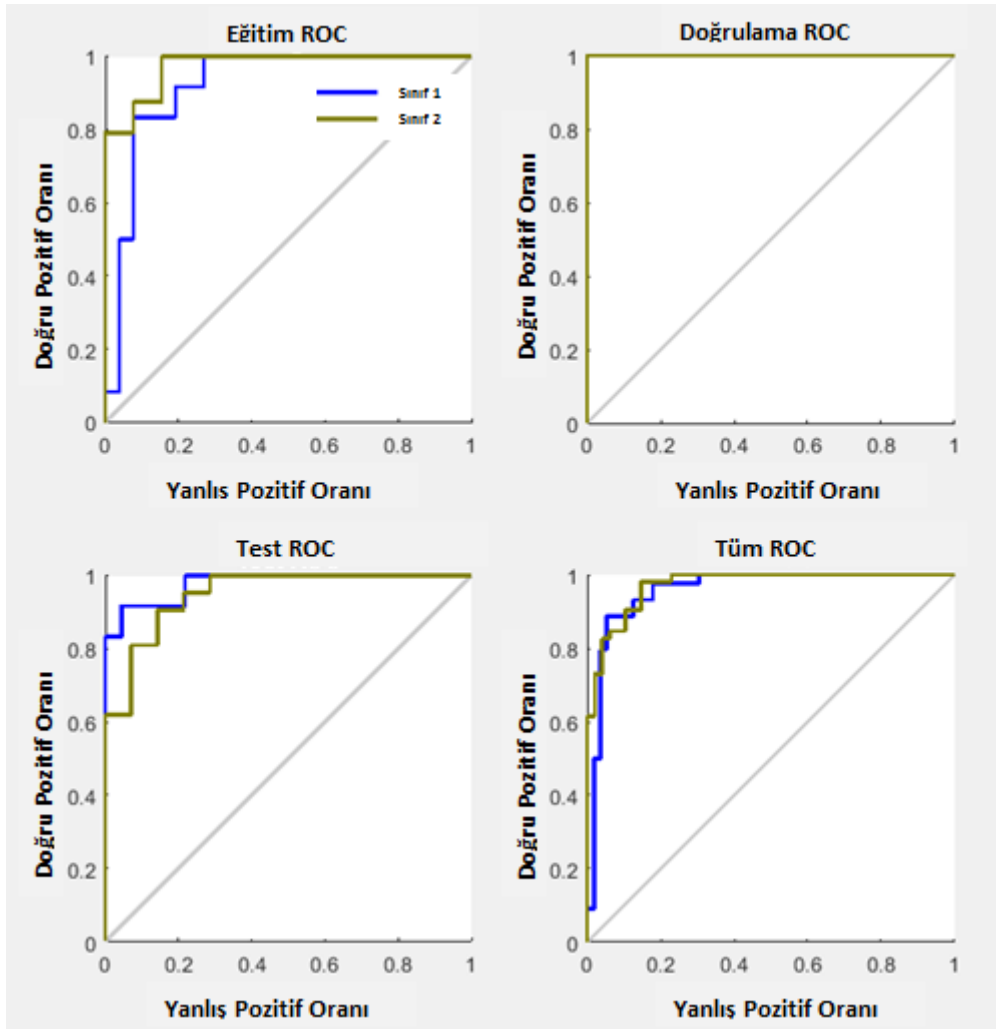
**Tablo 2:** Beş elemanlı lens sistemi için oluşturulan, farklı nöron sayılarına sahip YSA mimarilerinin test performans sonuçları. (Table 2 Test performance results of ANN architectures with different neuron numbers created for a five-element lens system)

YSA Mimarisi	Test Veri Kümesi		
	Doğruluk	Duyarlılık	Belirlilik
3-5-2	83,4	77,2	76,8
3-10-2	84,7	77,1	84,4
3-15-2	80,2	73,0	79,8
3-20-2	80,7	73,1	82,4
<b>3-25-2</b>	<b>85,7</b>	<b>78,6</b>	<b>90,5</b>
3-30-2	81,8	74,3	85,4



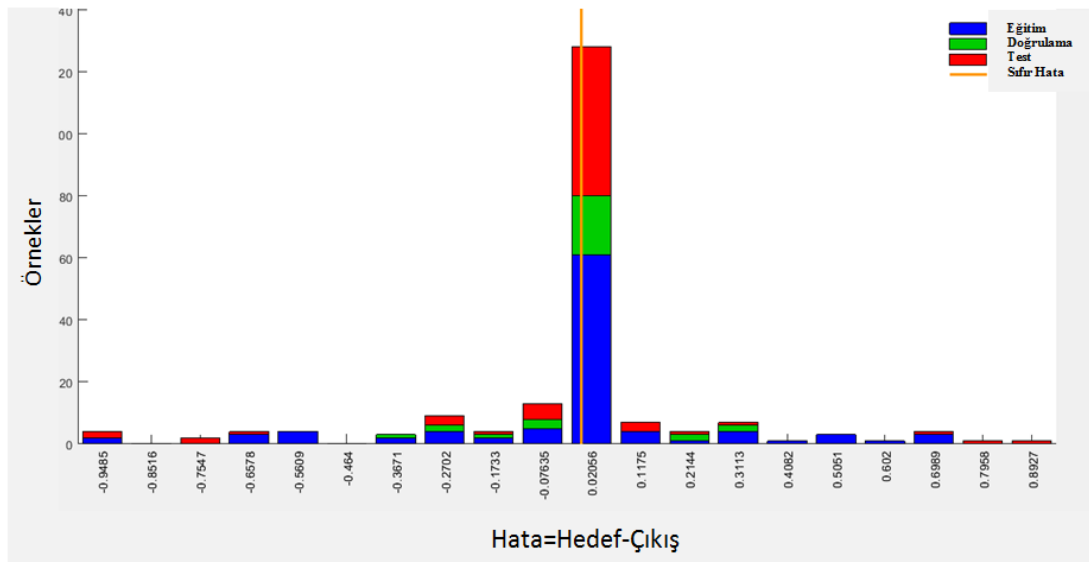
**Şekil 5:** Beş elemanlı lens sistemi için oluşturulan 3-25-2 YSA mimarisinin performans sonuçları. (Performance results of 3-25-2 ANN architecture created for five element lens system)

Sınıflandırma yeteneğinin belirlenmesinde elde edilen ROC eğrisi, Şekil 6'da verilmektedir. Yanlış pozitif oranının doğru pozitif oranına göre grafiksel gösterimi olan ROC eğrisinde, sınıf 1 (mavi çizgi) (paralel demet modu) ile sınıf 2 (yeşil çizgi) (paralel olmayan demet modu) çizgisi altında kalan alan yüksek hassasiyette sınıflandırma sağlandığını göstermektedir.



**Şekil 6:** Beş-elemanlı elektrostatik silindir lens sistemlerinde paralel elektron demet modunu sınıflandırma yeteneğinin belirlenmesinde, 3-25-2 YSA mimarisine ait ROC eğrisi. (ROC curve of 3-25-2 ANN architecture in determining the ability to classify parallel electron beam mode in five-element electrostatic cylinder lens systems)

Ağ performansını incelemek için, şekil 7’de verilen 3-25-2 YSA mimarisine ait hata histogramı elde edilmiştir. Histogramda mavi kısımlar eğitim, yeşil alanlar doğrulama ve kırmızı alanlar ise test kısmını göstermektedir. Histograma bakıldığında, hataların çoğunun 0,02056 değerinde yükseldiği ve sıfıra yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.



**Şekil 7:** Elde edilen sonuçlara göre en iyi sınıflandırmayı sağlayan 3-25-2 YSA mimarisine ait hata histogramı. (Figure 7 Error histogram of 3-25-2 ANN architecture that provides the best classification according to the obtained results)

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, fizik alanındaki yenilikçi bir yaklaşım olan yapay sinir ağı beş-elemanlı elektrostatik silindirik lens sistemlerinde paralel demet modunu belirleyen lens voltaj oranlarını araştırmada kullanılmıştır. Elektrostatik silindirik lens voltajlarının değerlerine bağlı olarak, belirli cisim ( $P/D=5$ ) ve görüntü ( $Q/D=5$ ) noktalarında elektron demet çapı, sınır eleman metodunu kullanan CPO programı kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen CPO program verileri, YSA algoritmasının giriş verisi olarak kullanılmıştır. Farklı gizli katman nöron sayısı kullanılarak, ağ minimum hata ile en iyi performansı elde etmek için değerlendirilmiştir. Oluşturulan 3-25-2 YSA mimarisinin, yüksek doğrulukta performans değerlerine sahip olduğu bulunmuştur. Elde edilen YSA algoritması, istenilen paralel lens durumu için en uygun lens voltajlarını bulmada hızlı bir çözüm (yaklaşık birkaç saniye) üretmektedir. Çalışmada önerilen YSA algoritması, yüksek doğrulukta sonuçlar vermesi açısından deneysel sistem optimizasyonunda kullanılabileceği düşünülmektedir. Sunulan çalışma, ileride farklı metodlarla hesaplanan ya da deneysel olarak elde edilen veriler kullanılarak literatürdeki diğer yapay zeka algoritmaları ile de yapılabilecektir.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi 0337-NAP-16 nolu proje tarafından desteklenmektedir.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Al-Hagan O., Kaiser C., Madison D., Murray A. J., 2009. Atomic and Molecular Signatures for Charged Particle Ionization, *Nature Physics*, 5, 59-63.
- Bayram T., Akkoyun S., Kara S. O., 2014 . A Study on Ground-State Energies of Nuclei by using Neural Networks, *Ann. Nucl. En.*, 63, 172-175.
- Cubric D., Lencova B., Read F. H., Zlamal J., 1999. Comparison Of FDM, FEM and BEM for Electrostatic Charged Particle Optics, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. Sec. A: Acc. Spect. Det. Assoc. Equip.*, 427:1, 357-362.
- Harting E., Read F. H., 1976. *Electrostatic Lenses*, Elsevier Science Yayınevi.
- Haykin S., 1999. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall,
- Heddl D.W.O., 2000. *Electrostatic Lens Systems*, IOP Press, London.
- Işık A. H., 2015a. The Investigation of Electron-Optical Parameters Using Artificial Neural Networks, *Acta Phy. Pol. A.*, 127:4, 1317-1319.
- Işık A. H., 2015b. Prediction of Two-Element Cylindrical Electrostatic Lens Parameters using Dynamic Artificial Neural Network, *Acta Phy. Pol. A.*, 127:6, 1717-1721.
- Işık A. H., Işık N., 2016b. Time Series Artificial Neural Network Approach for Prediction of Optical Lens Properties, *Acta Phy. Pol. A.*, 129:4, 514-516.
- Işık N., 2016. Determination of Electron Optical Properties for Aperture Zoom Lenses using an Artificial Neural Network Method, *Microscopy and Microanalysis*, Cilt. 22:2, 458-462,
- Işık N., Doğan M., Bahçeli S., 2016. Triple Differential Cross Section Measurements for the Outer Valence Molecular Orbitals (1t<sub>2</sub>) of A Methane Molecule at 250 eV Electron Impact, *J. Phys. B. At. Mol. Opt. Phys.*, 49, 065203-1-5.
- Işık N., Işık A. H., 2016a. Classification of Electron Gun Operation Modes using Artificial Neural Networks, *Acta Phy. Pol. A.*, 129:4, 628-630.
- Khan J., Wei J.S., Ringner M., Saal L.H., Ladanyi M., Westermann F., Berthold F., Schwab M., Antonescu C.R., Peterson C., Meltzer P.S., 2001. Classification and Diagnostic Prediction of Cancers using Gene Expression Profiling and Artificial Neural Networks *Nature Medicine* 7, 673-679.
- Lagaris I. E., Likas A., Fotiadis D. I., 1997. Artificial Neural Network Methods in Quantum Mechanics, *Comp. Phys. Com.*, 104, 1-14.
- Lahmam-Bennani A., 1991. Recent Developments and New Trends in (e,2e) And (e,3e) Studies, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 24, 2401-2442.
- Levenberg K., 1944. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares, *Quart. Appl. Math.*, 2, 164-168.
- Marquardt D., 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, *SIAM J. Appl. Math.*, 11, 431-441.
- Nouri T., Pierre-Jean E., 1992. Knowledge Based Optical System Design, *Proceedings of EXPER SYS-92*, 147-152.
- Petkovic D., Pavlovic N. T., Shamshirband S., Mat Kiah M.L., Badrul Anuar N., Idna Idris M.Y., 2014. Adaptive Neuro-Fuzzy Estimation of Optimal Lens System Parameters, *Opt. Lasers Eng.* 55. 84-93.
- Read F. H., Adams A., Soto-Montiel J. R., 1971. Electrostatic Cylinder Lenses. I. Two Element Lenses, *J. Phys. E (Sci. Instrum)*, 4, 625-632.
- Read F. H., Bowring N.J., 2011. The CPO Programs and The BEM for Charged Particle Optics, *Nucl. Inst. Meth. Phys.*, 645, 273-277.
- Sigman M. E., Rives S. S., 1994. Prediction of Atomic Ionization Potentials I-iii Using An Artificial Neural Network, *J. Chem. Int. Comput. Sci.*, 34, 617-620.

- Sise O., Okumus N., Ulu M., Dogan M., 2009. Computer Simulation of Electrostatic Aperture Lens Systems for Electron Spectroscopy, *J.Elec. Spectr. Rel. Phen.*, 175, 76-86.
- Sumpter B. G., Getino C., Noid D. W., 1992. A Neural Network Approach to The Study of Internal Energy Flow in Molecular Systems, *J. Chem. Phys.*, 97, 293-306.
- Tam S.M., Kwong C.K., Ip W.H. 2000. A Hybrid Artificial Intelligence System for Optical Lens Design, *Int. J. Comp. Appl. Techn.* 13, 229-236.
- Weng Z.C, Chen Z.Y., Yang Y.H., Ren T., Tong X.J., 1991. An Attempt to Develop a Zoom Lens Design Expert System, *Proceedings of the SPIE the International Society for Optical Engineering, SPIE, 1527, 349-356.*



## ESTIMATION OF THE FRICTION PARAMETERS OF LINEAR PNEUMATIC CYLINDERS

Mustafa DAĞDELEN\*, Mehmet İlteriş SARIGEÇİLİ

Çukurova University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Adana, Turkey

### Keywords

*Pneumatic Cylinder,  
Friction Force,  
Experimental Method.*

### Abstract

Nowadays, pneumatic actuation systems are utilized in many applications due to their outstanding advantages. However, the pneumatics possess nonlinear characteristics that complicate precise motion control. To extend the use of pneumatic actuators to different precise applications their non-linearity should be evaluated and compensated. This is only possible by correctly estimating the non-linear parameters that exist in pneumatic systems. The friction forces in pneumatic cylinders is one of the main nonlinear parameters. These parameters cannot be defined directly or listed precisely for any produced particular cylinder in manufacturer's catalog. They should be estimated accurately by experimental methods. This paper presents a new, simple and cheap experimental method for identification of friction force parameters for standard linear double acting pneumatic cylinders. Two different pneumatic cylinders have been examined with the proposed method and it has been seen that the results sound promising to use in later control applications.

## DOĞRUSAL PNÖMATİK SİLİNDİRLERİN SÜRTÜNME PARAMETRELERİNİN TAHMİNİ

### Anahtar Kelimeler

*Pnömatik Silindir,  
Sürtünme Kuvveti,  
Deneysel Yöntem.*

### Öz

Günümüzde pnömatik aktüatör sistemleri öne çıkan avantajlarından dolayı birçok uygulamada tercih edilmektedirler. Fakat bu sistemler hassas hareket kontrolünü zorlaştıran lineer olmayan karakteristikler barındırırlar. Pnömatik aktüatörlerin kullanımlarını farklı hassas uygulamalara da genişletebilmek için, doğrusal olmayan özelliklerinin belirlenip telafi edilmesi gerekir. Bunun tek yolu pnömatik sistemlerde mevcut olan doğrusal olmayan parametrelerin doğru bir şekilde tahmin edilmesidir. Pnömatik silindirlerdeki sürtünme kuvvetleri esas doğrusal olmayan parametrelerdir. Bu parametreler direkt olarak belirlenemezler ve üretici kataloglarında üretilen herhangi bir belirli silindir için hassas bir şekilde belirtilmezler. Bu parametrelerin deneysel yollarla hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma, standart, düz çift etkili pnömatik silindirlerin sürtünme kuvveti parametrelerinin saptanması için yeni, basit ve ucuz bir deneysel yöntem sunmaktadır. Önerilen yöntemle iki farklı pnömatik silindir incelenmiş ve sonuçların daha sonraki kontrol uygulamalarında kullanılması umut verici olduğu görülmüştür.

### Alıntı / Cite

Dağdelen, M., Sarıgeçili, M.İ., (2020). Estimation of The Friction Parameters of Linear Pneumatic Cylinders, Journal of Engineering Sciences and Design. 8(2), 397-406.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M.Dağdelen, 0000-0002-1448-104X  
M.İ.Sarıgeçili, 0000-0002-9969-2005

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	23.05.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	19.12.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	25.04.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

### 1. Introduction

Pneumatics are used as actuation systems widely in the applications of industry, medical science and robotic science (Harris et al., 2012; Dağdelen & Sarıgeçili, 2017). The pneumatics find also applications as specific as the

\* İlgili yazar/ Corresponding author: mdagdelen@cu.edu.tr, +90-322-338-60-84

rotation of a crank shaft in the form of pneumatic muscles as shown in Korucu et al. (2015). The pneumatic actuation systems have outstanding properties such as high power to weight ratio, high compliancy and safety, easy to maintain and fast response to commands (Guenter et al., 2006; Földi et al., 2011; Hejrati & Najafi, 2013). Even though they are preferred widely in many different type of applications, their main drawback is their non-linear behavior due to air compressibility, friction and stick-slip of sealing elements. (Wang et al., 2004; Andrighetto et al., 2006). They are mainly applied as on-off controlled elements with solenoid valves in most of the industrial applications which do not require precision control. However, they need more complex control strategies for precise motion behavior compared to the simple position control. In the complex control algorithms, the main scope is to control both the position and force relationship of pneumatic actuators together. Hence, application of these algorithms are highly dependent on estimation of the friction parameters of pneumatic cylinders. Unfortunately, accurate and precise values of friction parameters for any particular cylinder do not exist (cannot be listed) in catalogs of manufacturers.

A simple expression for pneumatic friction force is generally provided as in the form of Eq.1 in literature (e.g. Andrighetto et al., 2006). However, this expression (Eq.1) is not satisfactory for most of the control applications of pneumatic actuators since viscous friction coefficient,  $B$  is not included in the equation. The expression includes only friction coefficient ( $\mu$ ), working pressure ( $P$ ) and piston effective area ( $A$ ).

$$F_f = \mu * P * A \quad (1)$$

There are many suggestions for friction coefficient values in literature. But, there is no useful information on how to determine this coefficient. Generally, the suggestion of  $\mu$  value ranges between 0.02 and 0.20 as stated in Andrighetto et al. (2006). More detailed friction models should be included in modeling of pneumatic cylinders' applications for better control.

Generally, friction models include basic Coulomb, static, viscous and Stribeck type of friction (Liu et al., 2015; Lafmejani et al., 2016; Saleem et al., 2009). More detailed friction models such as Dahl (Dahl, 1968), Karnopp (Karnopp, 1985), LuGre (de Wit et al., 1995), Elastoplastic (Dupont et al., 2000), Leuven (Swevers et al., 2000), Generalized Maxwell Slip (Al-Bender et al., 2005), and modified LuGre model (Saha et al., 2016) exist in literature for any sliding mechanical system. According to the type of application, one of these friction models is selected and this model is chosen for pneumatic cylinder dynamics (Eq.2).

In literature, the researchers studied different friction models for pneumatic cylinders as well. Belforte and Raparelli (1989) proposed an experimental expression for friction forces in pneumatic cylinders. They tested different types of pneumatic cylinders and provided a general friction force equation. Wang et al. (2004) applied Static-Coulomb friction model and utilized Genetic Algorithms method for parameter estimation. Andrighetto et al. (2006) used Stribeck friction model and proposed an experimental method to define Stribeck friction parameters for different types and sizes of cylinders. Basic Static-Coulomb-Viscous friction model is selected by Saleem et al. (2009). They presented Mixed-Reality Environment method for determination of static, Coulomb and viscous friction parameters in pneumatic cylinders. Chang et al. (2012) studied the friction characteristics of pneumatics cylinders under dry and lubricated conditions. Bo Tran et al. (2013) proposed new modified LuGre friction model for pneumatic cylinders and they developed an experimental method to define the parameters of modified LuGre model for pneumatic cylinders. Richter et al. (2014) also utilized improved LuGre model for special pneumatic cylinders. They aimed to find friction parameters with a software application. Stribeck friction model is also preferred by Kosari & Moosavian (2015) for pneumatic cylinders. They proposed Recursive Least Square algorithm with the aid of experimental setup. Lafmejani et al. (2016) proposed a method to define Coulomb-viscous friction model parameters for pneumatic cylinders.

The methods studied are mostly complex friction models. When complex friction models are used in dynamic modeling of pneumatic cylinders, it gets harder to define the friction parameters. In conclusion, a basic and faster method should be developed for friction identification of standard pneumatic cylinders. Hence, this study aims at utilizing basic Coulomb-viscous friction model for pneumatic cylinders because this friction model can enable good control opportunity for the most of pneumatic control applications (Kosari & Moosavian, 2015). For that reason, an experimental setup is constructed. Pneumatic cylinders' Coulomb friction force ( $F_c$ ) and viscous friction coefficient ( $B$ ) are estimated by evaluating the data from experimental setup. To simplify the equations and parameter evaluation process, the experiments take place on horizontal plane eliminating gravitational effects.

2. Material and Method

2.1. Mathematical Model

The general dynamic model of standard pneumatic cylinders can be given as in Eq.2. In this equation,  $M$  is the total mass that corresponds to the summation of piston-rod mass ( $M_p$ ) (Fig.1) and excessive payload mass ( $M_e$ ) (if exist on the system).  $\ddot{x}$  represents the acceleration of total moving mass  $M$ .  $F_{net}$  is the net output force acting on total mass of  $M$ .  $F_{cyl}$  is net produced pneumatic force due to the pressure difference in chambers  $a$  and  $b$  as shown in Fig.1.  $F_{ext}$  is the applied external force to pneumatic cylinder rod. In Eq.3,  $P_a, P_b$  are the pneumatic pressures in chambers.  $P_{atm}$  is the atmospheric pressure;  $A_a$  and  $A_b$  are chambers' effective areas where working pressure act on.  $A_{rod}$  is the cylinder rod cross sectional area that is namely  $(A_a - A_b)$  as shown in Fig.1. In this type of model, the friction between moving mass and the ground surface is eliminated by using rollers supporting  $M_e$ . It should also be kept in mind that any type of friction force is opposite to the motion direction. For the objective of this study, both external force and net produced cylinder force is assumed to be in the direction of motion.

$$F_{net} = F_{cyl} - F_f + F_{ext} = M * \ddot{x} \tag{2}$$

$$F_{cyl} = P_a * A_a - P_b * A_b - P_{atm} * A_{rod} \tag{3}$$

Friction force model used in this study is shown in Fig.2 and denoted by  $F_f$ . The combined Coulomb-viscous friction model is given by Eq.4. In this notation,  $F_c$  is the Coulomb friction force at the onset of piston motion and  $B$  denotes viscous friction coefficient which is related with the pneumatic cylinder speed,  $\dot{x}$ .

$$F_f = F_c + B * \dot{x} \tag{4}$$

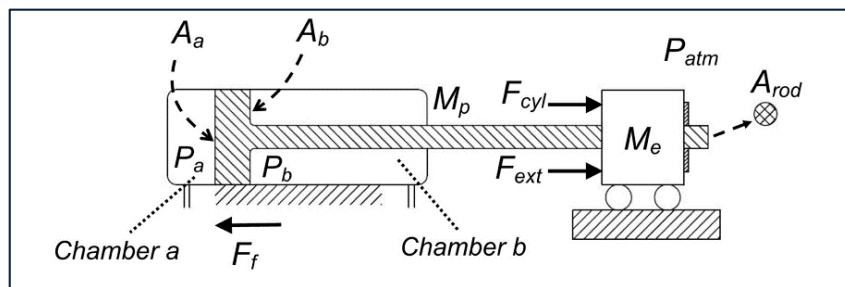


Figure 1. Standard pneumatic cylinder and its parameters

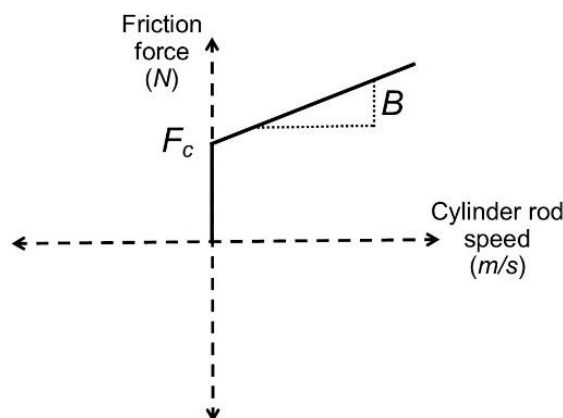


Figure 2. Combined Coulomb-viscous friction model curve

2.2. Proposed Method

The proposed method in this study includes applying an external force to the cylinder rod and in result measuring the sensory outputs as in the form of position ( $x$ ) and force applied ( $F_{ext}$ ) under the conditions where both chambers are open to atmosphere ( $P_a = P_b = P_{atm}$ ). Hence,  $F_{cyl}$  becomes zero in Eq.3. The experiments took place at constant speeds ( $\ddot{x} = 0$ ) and there is no payload mass existing on the system ( $M_e = 0$ ). According to these criteria, Eq.2 and Eq.3 are rearranged and combined together as in the form of Eq.5 that is going to be studied.



$$F_{ext} = F_c + B * \dot{x} \tag{5}$$

In order to take advantage of Eq.5, cylinder rod should be set to motion in different speed levels by applying varying external load  $F_{ext}$  which can be either known weights or known user force applied externally. In this study, user applied external force is utilized since the experiments take place in horizontal plane.

The proposed method in this study has following two steps:

- The first step is to estimate Coulomb friction force ( $F_c$ ) value by applying an increasing external force ( $F_{ext}$ ) until the piston starts motion. The threshold force value would be  $F_{ext} = F_c$  based on Eq.5 since both speed and acceleration are zero.
- The second step is to estimate the viscous friction coefficient ( $B$ ) by applying a force such that the piston moves at a constant speed. Hence, based on Eq.5, acceleration of piston would be zero and viscous friction coefficient can be calculated directly by using  $F_c$  value found in the previous step with Eq.5.

### 2.3. Experimental Setup and Measurement Technique

Experimental setup includes, a basic pneumatic system. This system setup includes a double acting pneumatic cylinder, two speed control valves, one 5/3 directional control valve and air preparation unit, a load cell, a load cell amplifier, a linear potentiometer to measure linear position, two microcontroller boards (Arduino) and a PC for power source as well as serial output of measured variables ( $x$  and  $F_{ext}$ ) to the screen. The equipment used in this study is shown in Fig.3 and listed in detail in Table 1. Both input and output port of the actuator are opened to atmosphere. Even, no pneumatic pressures are applied to the chambers, a full pneumatic system is constructed for proposed experiments. Therefore, pneumatic actuator can be easily driven with an external force  $F_{ext}$  applied to its rod tip by any user.

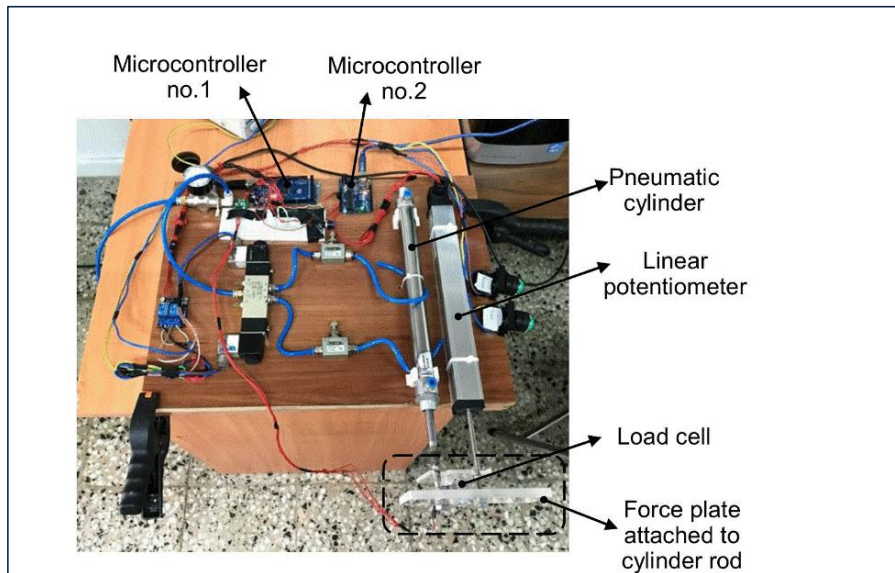


Figure 3. Experimental setup

Table 1. Experimental setup specifications

<b>Pneumatic cylinder</b>	250 mm stroke 25 mm piston diameter Double acting pneumatic cylinder
<b>Linear potentiometer</b>	250 mm stroke 0.01 mm resolution 0-5 V analogue output
<b>Load cell</b>	0-10 kg capacity 0-5 V analogue output
<b>Load Cell amplifier</b>	1.6 mA 2.6-5.5 V output
<b>Microcontroller</b>	Microcontroller no.1-Arduino Mega Microcontroller no.2-Arduino Uno
<b>PC</b>	64bit 2400 CPU 3.10 GHz processor

In this study, a plate joining cylinder and potentiometer is constructed to join the cylinder rod and linear potentiometer together. (Fig.4a). Load cell is then connected to this plate in a special way. There are two intermediate plates to direct external force correctly. (Fig.4b).

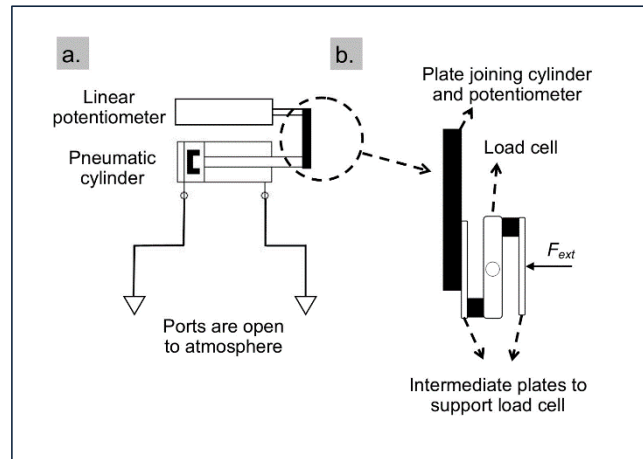


Figure 4. Load cell configuration

Two Arduino microcontrollers are used in the name of Microcontroller no.1 and Microcontroller no.2 shown in Fig.5. Microcontroller no.1 is used for force measurements only. Load cell is connected to this Arduino via a load cell amplifier. Force measurements are monitored via Arduino serial monitoring screen on PC with Arduino IDE interface. On the other hand, Microcontroller no.2 is used for kinematic measurements (position and velocity). This Arduino is connected to the MATLAB Simulink. A proper block diagram is constructed and position measurements are recorded. Velocity of the cylinder rod is derived from the first derivative of the position data as shown by MATLAB block diagram in Fig.6. Gain defines a conversion coefficient which is used to convert Analogue output 0-5 V of linear potentiometer to displacement value of pneumatic cylinder (0-250 mm). It is simply calculated as  $250/1024=0.2441$ .

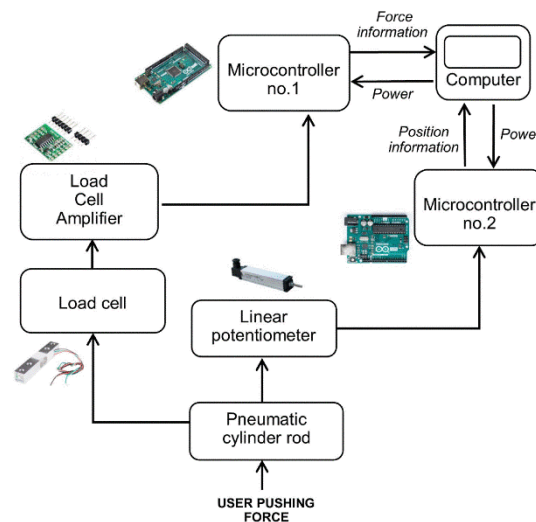


Figure 5. Experimental setup details and electronic system chart

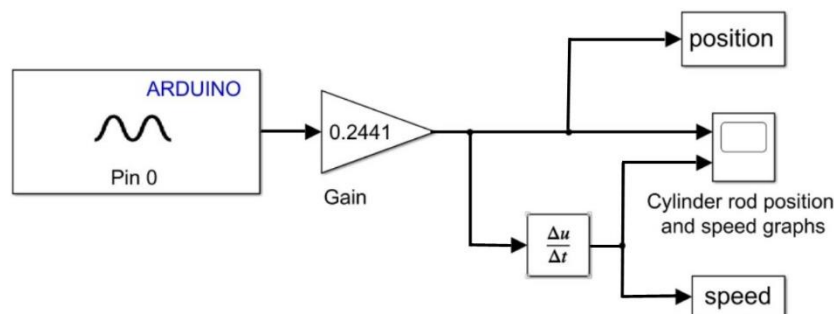


Figure 6. MATLAB Simulink block diagram for measurement of kinematic data

Experiments took place in both motion direction of cylinder rod i.e. extension motion (position from 0 to 250 mm) and retraction motion (from 250 to 0 mm). To be able to measure the applied external forces in both extension and retraction motions, the load cell has to be configured in two different modes. In the extension mode, the load cell is assembled on the right side of the joining plate (Fig.7a) whereas in the retraction mode it is assembled on the left side (Fig.7b).

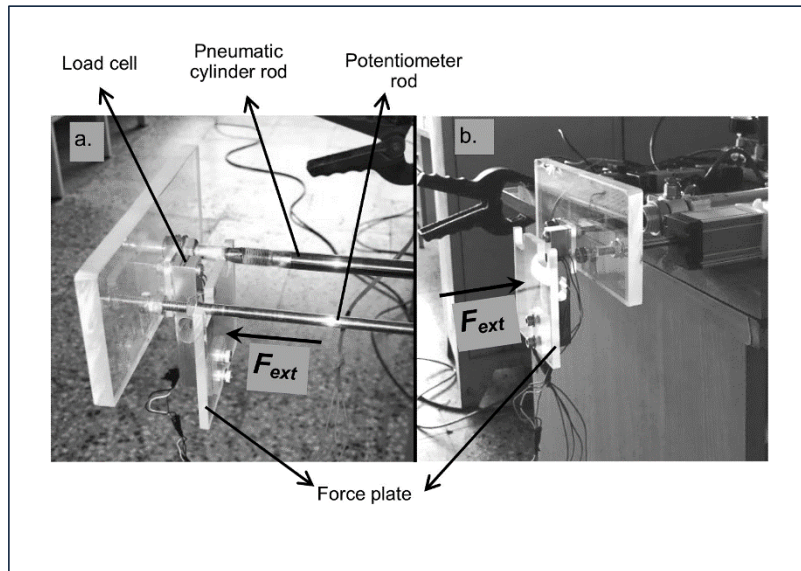


Figure 7. Force plate location according to the movement direction. (a. Extension mode, b. Retraction mode)

### 3. Experimental Results

The Coulomb friction force ( $F_c$ ) and viscous friction coefficient ( $B$ ) are evaluated for both extension and retraction modes of a pneumatic cylinder. In the evaluation of extension Coulomb friction force estimation, first the rod is fully retracted, i.e.  $x=0$  mm. Then, the rod is pushed gradually until it starts motion. The application of the force is stopped and the applied force data ( $F_{ext}$ ) at the onset of motion is read from the screen and recorded. This process is repeated through the stroke length at twelve different positions until the cylinder rod is fully extended, i.e.  $x=250$  mm. Each experiment is repeated ten times for the extension mode. Results are tabulated in Table 2. "C1" correspond to the first pneumatic cylinder evaluated in proposed setup.

On the other hand, the Coulomb friction force of the retraction mode is evaluated similarly. However, for this mode, the rod is fully extended, i.e.  $x=250$  mm, at the beginning of each experiment. Then, the rod is pushed for retraction gradually until the motion starts. The threshold force value is recorded immediately. This process is repeated twelve times in one retraction phase and these experiments are repeated for ten times for the retraction mode. Results are tabulated in Table 3.

Table 2.  $F_c$  Values- Extension mode-C1

Step	Experiment #									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6.082	5.562	9.565	8.025	6.494	9.506	8.623	4.777	5.621	6.259
2	6.396	3.051	5.758	6.033	6.043	6.455	4.885	4.120	4.709	4.660
3	5.739	4.866	4.110	5.768	4.836	4.748	6.004	4.365	5.278	4.248
4	6.004	3.061	5.513	5.798	4.464	5.817	4.415	6.278	5.278	6.357
5	7.848	6.298	4.091	5.013	6.455	4.346	4.513	4.934	4.061	3.836
6	4.670	4.719	6.288	5.346	6.288	5.876	4.621	5.023	5.631	6.249
7	6.916	6.092	5.651	7.770	4.611	5.091	6.563	4.140	8.368	3.306
8	5.474	5.376	4.424	4.807	3.326	5.003	5.552	4.817	7.828	4.827
9	5.739	5.562	5.023	5.278	5.494	6.161	4.591	5.376	5.003	4.630
10	4.150	5.415	4.503	5.317	3.031	5.258	4.983	5.337	5.111	3.924
11	6.563	3.757	8.603	5.327	5.827	5.866	5.072	4.846	5.631	6.789
12	6.651	7.416	7.191	5.052	5.454	5.729	4.493	5.955	5.474	5.160
$\bar{F}_c$ (N)	6.019	5.098	5.893	5.794	5.194	5.821	5.360	4.997	5.666	5.020
	5.486									

**Table 3.**  $F_c$  Values- Retraction mode-C1

Step	Experiment #									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4.581	9.153	6.347	9.692	6.043	6.151	8.299	7.858	5.160	7.338
2	4.042	3.934	4.944	3.434	4.807	4.679	5.464	3.257	7.024	4.326
3	5.131	4.934	7.720	4.807	3.483	6.043	4.709	6.190	4.199	4.365
4	6.170	3.286	6.014	4.267	4.228	5.337	5.611	4.885	4.974	4.699
5	5.621	6.161	4.974	3.846	6.739	5.513	5.454	2.943	5.091	4.797
6	5.915	4.218	9.535	4.670	5.415	6.033	5.258	3.747	4.130	5.003
7	5.847	6.671	5.180	6.789	5.827	4.464	5.150	5.758	3.365	4.777
8	5.052	4.807	5.857	4.866	7.720	5.150	5.994	5.700	3.326	5.994
9	5.003	4.002	4.336	4.807	6.514	5.935	5.749	5.484	4.660	6.416
10	3.885	5.101	5.052	6.416	4.385	6.259	5.660	5.189	4.562	6.347
11	7.877	3.934	4.630	4.827	4.454	5.425	5.729	3.895	5.189	4.827
12	2.649	6.102	4.130	3.355	5.239	3.983	6.308	5.131	5.611	4.326
$\bar{F}_c$ (N)	5.148	5.192	5.727	5.148	5.404	5.414	5.782	5.003	4.774	5.268
	5.286									

After the evaluation of Coulomb friction force values the viscous friction coefficient ( $B$ ) can be evaluated as follows: For extension mode, cylinder rod is retracted fully. An external force is applied for extension to the force plate (Fig.7a) at constant speed through the full stroke. Applied load  $F_{ext}$  is recorded as well as the average constant speed  $\dot{x}$  as shown in Simulink screen (Fig.8). These results are substituted into Eq.5 together with previously obtained Coulomb friction force value for extension mode (average result from Table 2). The corresponding viscous friction coefficient  $B$  can be easily calculated. This experiment is repeated for ten times. For the retraction mode, the same procedures are applied except that the cylinder rod is fully extended at the beginning. An external force is applied for retraction (Fig.7b) at constant speed through the full retraction stroke. By identifying the applied external force and the average constant speed, the viscous friction coefficient can be calculated by Eq.5 for the retraction mode. This experiment is also repeated ten times for the retraction mode. Experimental results are shown in Table 4 and 5 for extension and retraction modes of cylinder 1, respectively.

**Table 4.**  $B$  values- Extension mode-C1

Experiment #	$F_{ext}$ (N)	$\dot{x}$ (m/s)	$B$ (Ns/m)	$\bar{B}$ (Ns/m)
1	17.650	0.115	105.771	103.428
2	15.941	0.110	95.043	
3	16.400	0.122	89.237	
4	16.260	0.119	90.535	
5	16.980	0.101	113.799	
6	17.690	0.114	107.050	
7	19.610	0.120	118.150	
8	16.260	0.111	97.060	
9	18.060	0.107	117.511	
10	16.100	0.106	100.129	

**Table 5.**  $B$  values- Retraction mode-C1

Experiment #	$F_{ext}$ (N)	$\dot{x}$ (m/s)	$B$ (Ns/m)	$\bar{B}$ (Ns/m)
1	18.690	0.138	97.13	84.914
2	17.010	0.119	98.521	
3	15.940	0.111	95.982	
4	14.060	0.089	98.033	
5	17.570	0.168	73.119	
6	18.790	0.184	73.391	
7	17.000	0.198	59.161	
8	15.850	0.121	87.305	
9	19.160	0.173	80.196	
10	16.160	0.126	86.301	

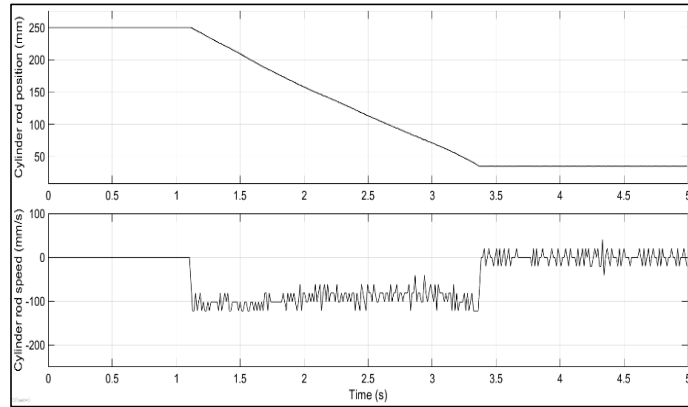


Figure 8. MATLAB Simulink kinematic data measurement screen (retraction mode)

Results of the experiments and calculation show that there is almost no difference between the Coulomb friction force values ( $F_c$ ) of extension and retraction modes. However, in the estimation of viscous friction coefficient ( $B$ ), it is obvious that, retraction mode friction coefficient value is lower than extension mode. To verify this situation, the same experiments are conducted on the same experimental setup with a different linear pneumatic cylinder in the name of cylinder 2 (C2) (double acting type, 300mm stroke and 25mm bore diameter). The values of Coulomb friction force and viscous friction coefficient for the corresponding modes are tabulated in Table 6 and 7, respectively. The results of the second pneumatic cylinder (C2) proved that the Coulomb friction force values are approximately same for both extension and retraction modes. Also, the viscous friction coefficient varies considerably for both extension and retraction.

Table 6.  $F_c$  Values- C2 (\* values in each row show the average of 12 values through cylinder stroke)

Experiment #	Extension* mode (N)	Retraction* mode (N)
1	6.864	7.586
2	6.105	6.020
3	6.194	6.508
4	5.774	6.636
5	7.082	6.828
6	6.207	6.412
7	6.875	7.452
8	6.663	6.258
9	6.114	6.058
10	6.503	7.217
$\bar{F}_c$ (N)	6.446	6.692

Table 7.  $B$  values-C2 (\*values in each row is calculated using Eq.5 with measured  $\dot{x}$  and  $F_{ext}$ )

Experiment #	Extension* mode (Ns/m)	Retraction* mode (Ns/m)
1	51.740	50.400
2	45.270	44.707
3	56.530	47.142
4	40.500	42.690
5	44.940	46.650
6	46.920	43.800
7	47.690	53.070
8	44.200	43.930
9	48.570	40.060
10	50.450	41.430
$\bar{B}$ (Ns/m)	47.681	45.387

The statistical analysis of the collected experimental data has been carried out for 95% confidence interval of the “student-t” distribution. The results are tabulated in Table 8. From Table 8, static Coulomb friction force ( $F_c$ ) has a standard deviation value closer to 1 (for both extension and retraction) and therefore it results a narrow confidence interval. However, the standard deviation for the viscous friction coefficient rises to the values of 13 for the “cylinder 1” and 4 for the “cylinder 2” which is due to the small number of experiments. However, as a

general method, the results prove that the friction parameters can be estimated with sufficient accuracy with increasing the number of experiments.

**Table 8.** 95% confidence intervals for the friction parameters of the tested pneumatic cylinders

Parameters	Standard deviation	Lower limit	Upper limit
Pneumatic cylinder 1- (C1) results			
$F_c$ – (extension) (N)	1.225	5.265	5.708
$F_c$ – (retraction) (N)	1.275	5.056	5.516
$B$ – (extension) (Ns/m)	10.701	95.774	111.083
$B$ – (retraction) (Ns/m)	13.308	75.395	94.433
Pneumatic cylinder 2- (C2) results			
$F_c$ – (extension) (N)	1.605	6.156	6.736
$F_c$ – (retraction) (N)	2.216	6.292	7.093
$B$ – (extension) (Ns/m)	4.482	44.475	50.887
$B$ – (retraction) (Ns/m)	3.811	42.662	48.114

#### 4. Discussion and Conclusion

In this study, a simple and cheap experimental method has been developed for estimating two unique nonlinear parameters of a particular linear pneumatic cylinder. They are Coulomb friction force,  $F_c$  and viscous friction coefficient,  $B$ . Only a load cell and a linear potentiometer were used as sensors. Cheap and readily available microcontroller Arduino was utilized with a main computer for data measurement and recording.

In this study, two linear pneumatic cylinders have been evaluated with the same experimental setup and same approach to show the effectiveness of proposed method. The parameters have been successfully calculated after a set of experiments. From the obtained results it is clear that pneumatic cylinder 1 (C1) has good and consistent Coulomb friction force  $F_c$  results, but relatively inconsistent viscous friction coefficient  $B$  results. On the other hand, in the examination of pneumatic cylinder 2 (C2), it is very obvious that the results are very promising. Friction force ( $F_c$ ) values and viscous friction coefficients ( $B$ ) are very consistent. However, some viscous friction coefficient ( $B$ ) values for C1 and C2 look like an outlier and not consistent at some speed levels, for both of extension and retraction modes. The reason behind that was probably the precision of load cell and some experimental rig errors. If a more precise load cell is used more consistent results can be obtained from this proposed method.

As a conclusion, in this study it has been verified that linear pneumatic cylinders have nearly similar Coulomb friction force ( $F_c$ ) values in both extension and retraction modes, however they can have different viscous friction coefficients  $B$  in two different motion modes. Knowing these parameters would help precisely develop the dynamic model of a pneumatic cylinder and then the developed dynamic model can be used for any other control applications of pneumatic actuators.

#### Acknowledgement

This project was funded by Çukurova University-ÖYP Coordination.

#### Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

#### References

Al-Bender, F., Lampaert, V., & Swevers, J., 2005. The generalized Maxwell-slip model: A novel model for friction simulation and compensation. IEEE Transactions on Automatic Control, 50(11), 1883–1887. <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.858676>

- Andrighetto, P. L., Valdiero, A. C., & Carlotto, L., 2006. Study of the friction behavior in industrial pneumatic actuators. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 2(2005), 369–376
- Belforte, G., D'Alfio, N., Raparelli, T., 1989. Experimental Analysis of Friction Forces in Pneumatic Cylinders. *The Journal of Fluid Control*, Vol.20, 42-60
- Chang, H., Lan, C. W., Chen, C. H., Tsung, T. T., & Guo, J. Bin., 2012. Measurement of frictional force characteristics of pneumatic cylinders under dry and lubricated conditions. *Przeglad Elektrotechniczny*, 88(7 B), 261–264
- Dağdelen, M., & Sarigeçli, M. İ., 2017. Development of a Conceptual Model for Wrist/Forearm Rehabilitation Robot with Two Degrees of Freedom. *Advances in Robot Design and Intelligent Control*, 523–530. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49058-8>
- DAHL, P. R., 1968. [19]-English: A Solid Friction Model (modèle Dahl). Technical Report, The Aerospace Corporation, El Segundo, 158
- De Wit, C. C., Olsson, H., Astrom, K. J., & Lischinsky, P., 1995. A New Model of Control Systems with Friction. *IEEE Transactions On Automatic Control*, 40(3), 419–425
- Dupont, P., Armstrong, B., & Hayward, V., 2000. Elasto-plastic friction model: Contact compliance and stiction. *Proceedings of the American Control Conference*, 2(June), 1072–1077. <https://doi.org/10.1109/acc.2000.876665>
- Földi, L., Beres, Z., Sarközi, E., 2011. Novel Cylinder Positioning System Realized by Using Solenoid Valves. *Sustainable Construction and Design*, 142-151
- Guenther, R., Perondi, E. C., Depieri, E. R., & Valdiero, A. C., 2006. Cascade controlled pneumatic positioning system with LuGre model based friction compensation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 28(1), 48–57. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782006000100006>
- Harris, P. G., O'Donnell, G. E., & Whelan, T., 2012. Modelling and identification of industrial pneumatic drive system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(9–12), 1075–1086. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3447-7>
- Hejrati, B., & Najafi, F., 2013. Accurate pressure control of a pneumatic actuator with a novel pulse width modulation-sliding mode controller using a fast switching On/Off valve. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 227(2), 230–242. <https://doi.org/10.1177/0959651812459303>
- Karnopp, D., 1985. Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems. *ASME J. Dyn. Sys., Meas., Control* 107(March 1985), 100–103
- Korucu, S., Samtaş, G., & Soy, G., 2015. Design and Experimental Investigation of Pneumatic Movement Mechanism Supported by Mechanic Cam and Crank Shaft. *TEM Journal*, 4(1), 22–34
- Kosari, H., & Moosavian, S. A. A., 2015. Friction compensation in a pneumatic actuator using recursive least square algorithm. *2015 Australian Control Conference, AUCC 2015*, 81–86
- Lafmejani, A. S., Masouleh, M. T., & Kalhor, A., 2016. An experimental study on friction identification of a pneumatic actuator and dynamic modeling of a proportional valve. *4th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics, ICRoM 2016*, 166–172. <https://doi.org/10.1109/ICRoM.2016.7886840>
- Liu, Y. F., Li, J., Zhang, Z. M., Hu, X. H., & Zhang, W. J., 2015. Experimental comparison of five friction models on the same test-bed of the micro stick-slip motion system. *Mechanical Sciences*, 6(1), 15–28. <https://doi.org/10.5194/ms-6-15-2015>
- Ritcher, R.R.M., Zamberian, C.V., Valdiero, A.C. & Rasia, L.A., 2014. Friction dynamics mathematical modelling in special pneumatic cylinder. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, vol.6, 800-808
- Saha, A., Wahi, P., Wiercigroch, M., & Stefański, A., 2016. A modified LuGre friction model for an accurate prediction of friction force in the pure sliding regime. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 80, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2015.08.013>
- Saleem, A., Wong, C. B., Pu, J., & Moore, P. R., 2009. Mixed-reality environment for frictional parameters identification in servo-pneumatic system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(10), 1575–1586. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.06.016>
- Swevers, J., Al-Bender, F., Ganseman, C. G., & Prajogo, T., 2000. An integrated friction model structure with improved presliding behavior for accurate friction compensation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(4), 675–686. <https://doi.org/10.1109/9.847103>
- Tran, X. B., & Yanada, H., 2013. Dynamic Friction Behaviors of Pneumatic Cylinders. *Intelligent Control and Automation*, 04(02), 180–190. <https://doi.org/10.4236/ica.2013.42022>
- Wang, J., Wang, J. D., Daw, N., Wu, Q. H., & Member, S., 2004. Identification of Pneumatic Cylinder Friction Parameters Using Genetic Algorithms. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 9(1), 100–107



## TÜRKİYE'DEKİ GÜNCEL BİYOKÜTLE POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ VE YAKILMASIYLA ENERJİ ÜRETİMİ İYİ BİR ALTERNATİF OLAN BİYOKÜTLE ATIKLAR İÇİN SEKTÖREL AÇIDAN VE TOPLAM YANMA ENERJİ DEĞERLERİNİN HESAPLANMASI

Barış GÜREL\*

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Biyokütle,  
Yanma Enerji Değeri,  
Atık Miktarı.*

### Öz

Türkiye'nin hızla gelişen ekonomisinden ve yüksek nüfus artışından dolayı; Türkiye'deki elektrik enerjisi tüketimi 2018 yılında bir önceki yıla göre %2,2 artarak 304,2 milyar kWh, elektrik üretimi ise bir önceki yıla göre %2,2 oranında artarak 304,8 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. 2019 yılı Eylül ayı sonu itibarıyla Türkiye'nin kurulu gücü 90.720 MW'a ulaşmıştır. 2019 yılı Eylül ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı; yüzde 31,4'ü hidrolik enerji, yüzde 28,6'sı doğal gaz, yüzde 22,4'ü kömür, yüzde 8,1'i rüzgâr, yüzde 6,2'si güneş, yüzde 1,6'sı jeotermal ve yüzde 1,7'si ise diğer kaynaklar şeklindedir. Enerji ihtiyacımızın günden güne artmasına rağmen, Türkiye birincil enerji talebinin %76'sını ithalat yoluyla karşılamaktadır. Enerji ihtiyacımızın kendi öz kaynaklarımız ile karşılanması durumunda hem ülke ekonomimizin dışa bağımlılığının azaltılması hem de maliyetlerin azaltılması sağlanabilecektir. Türkiye'nin biyokütle atık potansiyelinin yaklaşık 8,6 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) ve üretilebilecek biyogaz miktarının ise 1,5-2 MTEP olduğu tahmin edilmektedir. Yerli enerji kaynaklarımızdan biri olan biyokütle Türkiye açısından önemli bir potansiyele sahiptir ve bu anlamda biyokütle odaklı enerji politikalarının geliştirilmesinin Türkiye'de sürdürülebilir, yerli, ucuz ve temiz enerji eldesin de ciddi anlamda kazançlar sağlayacağı aşikardır. Bu çalışmada, Türkiye'deki güncel atık biyokütle potansiyeli belirlenmiş ve atıkların yakılması suretiyle elde edilecek enerji miktarları atık bazında hesaplanmıştır. Türkiye'de ki hayvansal, tarımsal, kentsel organik, kereste, endüstriyel odun üretimi, ahşap bazlı panel ve arıtma çamuru atık miktarları belirlenmiş ve yakılarak kullanılması enerji üretimi açısından iyi bir alternatif olan atıkların yanma enerji değerleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak Türkiye'deki toplam biyokütle atıkların yanma enerji değeri 2018 yılında 184,647 PJ'dür. Ayrıca, potansiyeli en fazla atık olan tavuk atıklarının temiz ve verimli yakılması için gerekli olan teknolojilerin geliştirilmesi ve altyapının oluşturulmasının Türkiye'de hem sürdürülebilir hem de temiz/ucuz enerji eldesi için önem arz edeceği sonucuna ulaşılmıştır.

## DETERMINATION OF CURRENT BIOMASS POTENTIAL IN TURKEY AND CALCULATION OF SECTORAL AND TOTAL COMBUSTION ENERGY VALUES FOR WASTES WHICH ARE A GOOD ALTERNATIVE FOR ENERGY PRODUCTION BY COMBUSTION

### Keywords

*Biomass,  
Combustion Energy Value,  
Waste Amount.*

### Abstract

Because of the rapidly growing economy and high population growth; electricity consumption in Turkey increased by 2.2% in 2018 compared to the previous year, 304.2 billion kWh, while electricity generation increased by 2.2% compared to the previous year and amounted to 304.8 billion kWh. As of the end of September 2019, the installed capacity of our country has reached 90,720 MW. As of the end of September 2019, the distribution of our installed capacity according to resources; 31.4 percent hydraulic energy, 28.6 percent natural gas, 22.4 percent coal, 8.1 percent wind, 6.2 percent solar, 1.6 percent geothermal and 1.7 percent are other sources. Although our energy needs increase day by day, our country meets 76% of

\* İlgili yazar / Corresponding author: barisgurel@sdu.edu.tr, +90-246-211-0805



primary energy demand through imports. If our energy needs are met with our own resources, it will be possible to reduce the dependence of our country's economy on foreign sources and to reduce costs. Turkey's biomass waste potential of about 8.6 million tons oil equivalent (MTOE) and the amount of biogas that can be produced is estimated to be 1.5 to 2 MTOE. Biomass, which is one of our domestic energy resources, has a significant potential for our country and it is obvious that the development of biomass-oriented energy policies will provide significant gains in the production of sustainable, domestic, cheap and clean energy in our country. In this study, current waste biomass potential determined and the amount of energy obtained by the incineration of waste in Turkey are calculated on the waste scope. Animal, agricultural and urban organic, timber, wood industrial production of wood based panels and treatment waste sludge amounts were determined and combustion energy values of wastes, which are a good alternative in terms of energy production, were calculated in the Turkey. As a result, combustion energy values of biomass wastes, which are a good alternative in terms of energy production, were calculated in Turkey is 184,647 in 2018. In addition, it is concluded that the development of the technologies and the infrastructure necessary for the clean and efficient incineration of chicken wastes will be important for obtaining sustainable and clean / cheap energy in Turkey.

#### Alıntı / Cite

Gürel, B., (2020). Türkiye'deki Güncel Biyokütle Potansiyelinin Belirlenmesi ve Yakılmasıyla Enerji Üretimi İyi Bir Alternatif Olan Biyokütle Atıklar İçin Sektörel Açından ve Toplam Yanma Enerji Değerlerinin Hesaplanması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 407-416.

#### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

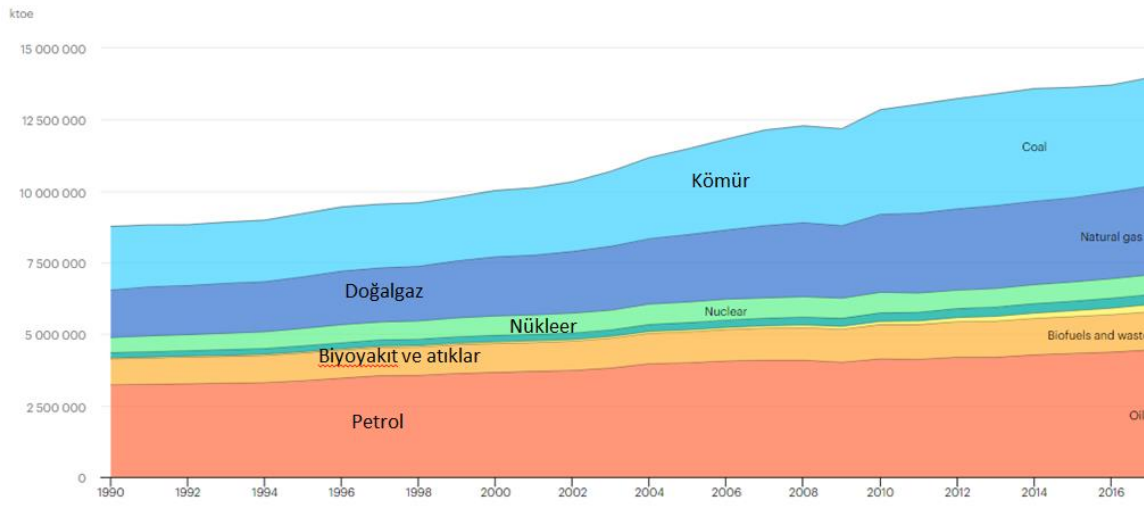
B.Gürel, 0000-0002-1780-2603

#### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	07.01.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	13.04.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	17.05.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Dünya'da ki toplam birincil enerji kaynaklarının payı 1990-2007 yılları için Şekil 1'de (<https://www.iea.org/data-and-statistics,2019>) verilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü üzere Petrolün enerji üretimindeki payı 4.449.499 KTOE (kilo ton eşdeğer petrol) iken biyo yakıtların ve atıkların payı 1.329.064 KTOE, hidrolik enerjinin payı 351.029 KTOE, nükleer enerjinin payı 687.481 KTOE, doğalgazın payı 3.106.799 KTOE ve kömürün payı'da 3.789.934 KTOE'dir.



Şekil 1. Dünyada'ki Toplam Birincil Enerji Kaynakları (Total Primary Energy Sources in the World)

Türkiye'nin hızla gelişen ekonomisinden ve yüksek nüfus artışından dolayı; Türkiye'deki elektrik enerjisi tüketimi 2018 yılında bir önceki yıla göre %2,2 artarak 304,2 milyar kWh, elektrik üretimi ise bir önceki yıla göre %2,2 oranında artarak 304,8 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. 2018 yılında, Türkiye'de ki elektrik üretiminin, %37,3'ü kömürden, %29,8'i doğal gazdan, %19,8'i hidrolik enerjiden, %6,6'sı rüzgârdan, %2,6'sı güneşten, %2,5'i jeotermal enerjiden, ve %1,4'ü diğer kaynaklardan elde edilmiştir (T.C. ETKB,2019). 2019 yılı Eylül ayı sonu

itibarıyla Türkiye'nin kurulu gücü 90.720 MW'a ulaşmıştır. 2019 yılı Eylül ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı; yüzde 31,4'ü hidrolik enerji, yüzde 28,6'sı doğal gaz, yüzde 22,4'ü kömür, yüzde 8,1'i rüzgâr, yüzde 6,2'si güneş, yüzde 1,6'sı jeotermal ve yüzde 1,7'si ise diğer kaynaklar şeklindedir (T.C. ETKB,2019). Enerji ihtiyacımızın günden güne artmasına rağmen, Türkiye birincil enerji talebinin %76'sını ithalat yoluyla karşılamaktadır (T.C. ETKB,2019). Enerji ihtiyacımızın kendi öz kaynaklarımız (yenilenemiyen ve yenilenebilen) ile karşılanması durumunda hem ülke ekonomimizin dışa bağımlılığının azaltılması hem de maliyetlerin azaltılması sağlanabilecektir. Türkiye bulunduğu coğrafya ve iklimden dolayı önemli miktarda yenilenebilir enerji kaynaklarına sahiptir (Başçetinçelik, 2006). Başlıca biyokütle kaynaklarımız arasında; hayvansal atıklar, tarımsal atıklar, kentsel organik atıklar, kereste atıkları, endüstriyel odun üretimi atıkları, ahşap bazlı panel atıkları ve atık arıtma çamurları yer almaktadır. Türkiye'nin biyokütle atık potansiyelinin yaklaşık 8,6 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) ve üretilebilecek biyogaz miktarının ise 1,5-2 MTEP olduğu tahmin edilmektedir (<https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>, 2019). Sonuç olarak; yerli enerji kaynaklarımızdan biri olan biyokütle Türkiye açısından önemli bir potansiyele sahiptir ve bu anlamda biyokütle odaklı enerji politikalarının geliştirilmesinin Türkiye'de sürdürülebilir, yerli, ucuz ve temiz enerji eldesinde ciddi anlamda kazançlar sağlayacağı aşikardır.

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Türkiye'deki biyokütle potansiyeli ve biyokütle atıkların enerjiye dönüşüm teknolojileriyle ilgili literatürde yapılmış çalışmalar bulunmaktadır:

Kurt ve Koçer, yaptıkları çalışmada Malatya ili'nde bir yılda elde edilen ortalama kuru biyokütle miktarı ve kuru biyokütle'nin ortalama ısı değeri hesaplanmış, Malatya ili için biyokütle potansiyelinden etkin ve yaygın bir şekilde faydalanmak için önerilerde bulunulmuştur(Kurt ve Koçer, 2010).

Karayılmazlar vd., yaptıkları çalışmada biyokütle yetiştiriciliğinin ülkemizdeki potansiyeli ve önemi hakkında bilgiler vermişler ve bu kapsamda biyokütlenin enerji üretiminde değerlendirilme olanaklarını ele almışlardır(Karayılmazlar vd., 2011).

Sözen vd., yaptıkları çalışmada, biyoyakıtların enerji kaynağı olarak kullanılması ve ekonomiye katkılarını incelemişlerdir. Ayrıca, yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan duman ve gazların çevre ve sağlık açısından değerlendirilmesini yaparak bu alanda yapılacak çalışmalar için literatür oluşturmuşlardır(Sözen vd., 2017).

Üçgül ve Akgül, yaptıkları çalışmada öncelikle biyokütleden enerji üretim teknolojilerini özetlemişler ve Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezin'de biyokütle ile ilgili yapılan çalışmaları sunmuşlardır(Üçgül ve Akgül, 2010).

Olgun vd., yaptıkları çalışmada; kurutulmuş her türlü organik atıkları (odun parçaları, hayvansal atıklar, kurutulmuş kanalizasyon çamuru, zirai atıklar, hastahane ve şehir atıkları gibi) temiz ve yanabilir gazlara dönüştürerek elektrik ve ısı enerjisi üretim sistemlerinde kullanılmasını sağlayan gazlaştırıcıları tanıtmışlar ve komple bir sistemin tasarım özelliklerini vermeye çalışmışlardır(Olgun vd., 2000).

Çağal yaptığı tez çalışmasında, yeni ve temiz kaynaklarla verimli ve sürdürülebilir enerji üretiminin giderek önem kazanması gerektiği düşüncesi ile biyokütle ve biyokütle enerjisi hakkında kaynak tarama çalışması yapmıştır. Fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunlara çözüm olabilecek biyokütle enerjisi, biyokütle enerjisinin Dünya enerji profili ve Türkiye profilindeki yerini değerlendirmiştir. Türkiye' deki yasal yapı içerisinde biyokütleden enerji üretiminin yeri ve uygulanabilirliği için gereken süreçler ile lisans alımını incelemişlerdir. Biyokütleden enerji üretimine örnek olarak enerji kullanımının yoğun olduğu sanayide biyogaz kullanarak elektrik ve ısı enerjisi üretimi yapan bir biyorafineri tesisini incelemiştir(Çağal, 2009).

Özcan vd., Türkiye'nin farklı kaynak tiplerine göre belirlenen biyokütle potansiyelinden elde edilebilecek elektrik enerjisi miktarını, uygulanabilir elektrik üretim teknolojilerine göre belirlemişlerdir. Çalışmada biyokütle kaynakları olarak kentsel katı atık, tarımsal ürün, hayvan gübresi ve kentsel atıksu arıtma çamuru değerlendirilmiştir. İncelenen biyokütle kaynağı tiplerinden elde edilebilecek biyogazın sahip olduğu toplam enerji değerinin 29.77 milyar kWh/yıl ıldığı belirtilmiştir. Bu kaynak tipine göre, biyogaz ve kurutulmuş biyokütle durumlarına ait hesaplar sonucu bulunan primer enerji potansiyelleri kullanılarak gaz motorlu sistem, gaz türbinli sistem (basit çevrim), gaz ve buhar türbinli sistem (kombine çevrim) ve kazan ve buhar türbinli sistem kullanılması durumlarındaki kurulu güç değerlerini belirlemişlerdir(Özcan vd., 2012).

Bu çalışmanın amacı, güncel olarak Türkiye'deki atık biyokütle kaynaklarının potansiyelini belirlenmesi, Türkiye ölçeğinde toplam yanma enerji değerlerinin hesaplanması ve bu konudaki çalışmalara yol gösterici olunmasıdır.

Bu çalışmada sektörel açıdan biyokütle potansiyeli belirlenmiş ve yakılarak enerji üretimi avantajlı olan yakıtların hem sektörel hem de toplam enerji değerleri güncel olarak hesaplanmıştır. Böylece gelecekte yapılacak biyokütle atıklarını yakma teknolojileriyle ilgili çalışmalarda hangi biyokütle atıkların yakıt olarak kullanılma potansiyelinin Türkiye açısından daha fazla olduğu belirlenmiş ve literatürdeki bu açık kapatılarak, yapılacak çalışmalara ışık tutulmuştur. Bu amaçla, çalışma sonucunda elde edilen güncel datalar kullanılarak Türkiye'deki atık biyokütle potansiyeli sektörel açıdan belirlenmiş ve yakılmasıyla enerji üretimi alternatiflerine göre daha avantajlı olan atıkların yakılması suretiyle elde edilecek enerji miktarları atık bazında hesaplanmıştır.

### 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Tablo 1'de TÜİK'ten (TÜİK, 2019) alınmış hayvan sayıları (H.S.) verilmiştir. Büyükbaş hayvan başına yılda 9,95 ton, küçükbaş hayvan başına yılda 0,82 ton ve tavuk başına yılda 0,03 ton atık miktarı (A.M.) olduğu bilinmektedir (Yorulmaz, 2006; Exploitation of agricultural in Turkey, 2005). Literatür çalışmalarından (Sahu vd., 2016) hayvansal atıkların kalorifik alt ısıl değerleri ( $H_u$ ) elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak Türkiye'de oluşan hayvansal atıkların toplam yanma enerji değerleri ( $Q_{top.yanma}$ ) Denklem 1 ve 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$A.M. \times H.S. = \sum A.M._{yillik} \quad (1)$$

$$\sum A.M._{yillik} \times H_u = \sum Q_{top.yanma} \quad (2)$$

Tablo 4'te 2016, 2017 ve 2018 yılları için Türkiye'deki tarımsal atık miktarları (buğday, arpa, mısır, ayçiçeği, pamuk ve şekerpancarı) (TÜİK,2019), ısıl değerleri ve toplam ısıl kapasiteleri yıl bazında verilmiştir. Literatür çalışmalarından atık katsayısı (A.K.), kullanılabilirlik oranı (K.O.) ve birim ısıl değerleri ( $H_u$ ) elde edilmiş (Karabaş, 2019) ve 2016, 2017 ve 2018 yılları için bu atıkların toplam yanma enerji değerleri ( $Q_{top.yanma}$ ) Denklem 4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sum Q_{top.yanma} = \sum A.M._{yillik} \times H_u \times A.K. \times K.O. \quad (3)$$

Tablo 5'te TÜİK verilerine göre, Türkiye'de 2014, 2016 ve 2018 yıllarındaki toplanan belediye atık miktarları verilmiştir. Tablo 5'ten görüldüğü üzere belediyelerde üretilen yıllık çöp miktarının ( $A.M._{yillik}$ ) 28 ile 32 milyon ton arasında değişmektedir. Belediye atıklarındaki organik atıkların oranı (A.O.) ve organik atıkların ısıl değeri ( $H_u$ ) (Yıldız vd., 2013) kullanılarak Türkiye'deki belediye atıklarının toplam yanma enerji potansiyelleri Denklem 4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sum Q_{top.yanma} = \sum A.M._{yillik} \times H_u \times A.O. \quad (4)$$

Tablo 6'da 2016, 2017 ve 2018 yılları için Türkiye'deki kereste atık miktarları ( $A.M._{yillik}$ ) ve bu atıkların yaklaşık ısıl değerleri ( $H_u$ ) verilmiştir. Tablo 6'da verilen kereste üretim miktarları Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün veri tabanından (FAOSTAT) alınmıştır. Atık kereste oranı (A.O.) ve kereste atıkların ısıl değerleri ( $H_u$ ) literatürden (Ballı, 2005; Yorulmaz, 2006) elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak toplam atık kereste miktarları ( $A.M._{yillik}$ ) ile toplam yanma enerji değerleri ( $Q_{top.yanma}$ ) yıl bazında Denklem 5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sum Q_{top.yanma} = A.M._{yillik} \times H_u \times A.O. \quad (5)$$

Tablo 7'de, TÜİK verilerine göre 2016, 2017 ve 2018 yılları için Türkiye'deki endüstriyel odun üretimi ( $m^3$ ) ( $E.Ü._{yillik}$ ) verilmiştir. Literatürden (Sims, 2002; Yorulmaz, 2006) alınan verilere göre endüstriyel odun üretimi (E.O.Ü.) 0,35 ton/ $m^3$ , atık miktarının üretime oranı (Ü.O.) ise 0,5'tir. Atığın ısıl değeri ( $H_u$ ) 9 MJ/kg (Sims, 2002)'dir. Belirtilen parametreler kullanılarak endüstriyel odun üretimi atıklarının toplam yanma enerji değerleri ( $Q_{top.yanma}$ ) Denklem 6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sum Q_{top.yanma} = E.O.Ü. \times E.Ü._{yillik} \times H_u \times Ü.O. \quad (6)$$

Tablo 8'de FAOSTAT verilerine göre 2016,2017 ve 2018 yılları için Türkiye'deki ahşap bazlı panel atık üretimi ( $m^3$ ) (P.A.Ü.) verilmiştir. Literatürden (FAOSTAT, 2019; Yorulmaz, 2006) alınan verilere göre kontraplak atık miktarı (A.M.) 0,25 ton/ $m^3$ , sunta atık miktarı (A.M.) 0,4 ton/ $m^3$  ve MDF atık miktarı (A.M.) 0,75 ton/ $m^3$ 'tür. Yine literatürden (Yorulmaz, 2006) alınan verilere göre kontraplak atık toplama ve kullanım etkinliği (K.E.) % 50 iken, kontraplak ısıl değeri ( $H_u$ ) 16 MJ/kg, sunta ve MDF ısıl değeri ( $H_u$ ) 17 MJ/kg'dır (Dias vd., 2005). Belirtilen parametreler kullanılarak ahşap bazlı panel atıklarının toplam yanma enerji değerleri ( $Q_{top.yanma}$ ) Denklem 7 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Sigma Q_{top,yanma} = P.A.Ü. \times A.M. \times H_u \times K.E. \quad (7)$$

Tablo 9’da, TÜİK verilerine göre 2014,2016 ve 2018 yılları için Türkiye’deki deşarj edilen kişi başi atık su miktarı(A.S. M.) verilmiştir. Literatürden alınan verilere göre organik atık miktarı(<http://www.enerji-dunyasi.com/yayin/356/-aritma-camuru-bir-enerji-kaynagi-olarak-kullanilmali-10051.html#.XdaX6L5R2U1>) ve arıtma çamurundaki organik atıkların ısıl değeri ( $H_U$ )(Pulp and paper sludge to energy, 2006;Yorulmaz, 2006) hesaba katılarak organik atıkların toplam yanma enerji değeri ( $Q_{top,yanma}$ ) Denklem 8 kullanılarak bulunmuştur.

$$\Sigma Q_{top,yanma} = A.S.M. \times K.S. \times H_u \quad (8)$$

Denklem 8’de Türkiye’deki kişi sayısı(K.S.) TÜİK verilerine göre 2014 yılında 65.569.060, 2016 yılında 65.573.770, 2018 yılında 65.573.768 olarak alınmıştır.

#### 4. Araştırma Sonuçları (Research Results)

Tablo 1’de görüldüğü üzere 2016 yılı verilerine göre Türkiye’deki toplam hayvan sayısı 384.420.704 iken 2017 yılında bu sayı 403.057.243’eve 2018 yılında ise 416.721.404’ e yükselmiştir.

**Tablo 1. Türkiye’deki Hayvan Sayıları (Number of Animals in Tyrkey)**

Yıl	Küçük Baş Hayvan Sayısı	Büyük baş Hayvan Sayısı	Et Tavuğu Sayısı	Yumurta Tavuğu Sayısı	Toplam Hayvan Sayısı
2016	41.329.232	14.080.155	220.322.081	108.689.236	384.420.704
2017	44.312.308	15.943.586	221.245.322	121.556.027	403.057.243
2018	46.117.399	17.042.506	229.506.689	124.054.810	416.721.404

**Tablo 2. Türkiye’de ki Hayvansal Atık Miktarı (Animal Waste Amount in Turkey)**

Yıl	Küçük Baş Atık Miktarı (ton)	Büyük Baş Atık Miktarı (ton)	Et Tavuğu	Yumurta Tavuğu	Toplam Hayvansal Atık Miktarı (ton)
			Alt Isıl Değer Miktarı (ton)	Atık Miktarı (ton)	
2016	33.889.970	140.097.542	6.609.662	3.260.677	183.857.852
2017	36.336.092	158.638.680	6.637.359	3.646.681	205.258.814
2018	37.816.267	169.572.934	6.885.200	3.721.644	217.996.047

Tablo 2’deki atık miktarları göz önüne alındığında, Türkiye’deki hayvansal atık’tan elde edilen enerji değerleri 2016 yılında 1.343,145 PJ, 2017 yılında 1.488,364 PJ ve 2018 yılında ise 1.575,198 PJ olarak hesaplanmıştır (Tablo 3). Tablo 3’te görüldüğü gibi 2016-2018 yılları arasında hayvansal atık yanma enerji değeri artmıştır. Ancak büyükbaş ve küçükbaş hayvan atıklarının tarımda gübre olarak kullanılmasının ve biyogaz yöntemiyle enerji üretilmesi, yakılması alternatifine göre daha avantajlı olmaktadır. Bu yüzden hayvansal atıklar yaygın olarak gübre olarak kullanılmaktadır. Et tavuğu ve yumurta tavuğu atıklarının ise içeriğindeki fazla asit ve azottan dolayı gübreleme işleminde kullanılması bitkiye zarar vermekte ve biyogazla enerji üretilmesi ise yakılmasına göre zor olmakta ve verimi düşük olmaktadır. Bu yüzden, et ve yumurta tavuğu atıklarının yakılmasıyla enerji üretimi iyi bir alternatiftir. Bu kapsamda, hayvansal atıklar içerisinde sadece tavuk atıklarının yanma enerji değerleri atıkların genel yanma enerjisi hesaplarında dikkate alınmıştır.

**Tablo 3. Türkiye’de ki Hayvansal Atık Yanma Enerji Değeri (Animal Waste Combustion Energy Value in Turkey)**

Yıl	Küçük Baş Atık Yanma Enerji Değeri (PJ)	Büyük Baş Atık Yanma Enerji Değeri (PJ)	Et Tavuğu Atık Yanma Enerji Değeri (PJ)	Yumurta Tavuğu Atık Yanma Enerji Değeri (PJ)	Toplam Hayvansal Atık Yanma Enerji Değeri (PJ)
2016	399,639	849,577	62,898	31,029	1.343,145
2017	428,484	962,014	63,162	34,702	1.488,364
2018	445,939	1028,322	65,520	35,415	1.575,198
				TOPLAM	4.406,707

**Tablo 4.** Türkiye’de ki Tarımsal Atık Miktarları ve Yanma Enerji Değerleri (Agricultural Waste Amounts and Combustion Energy Values in Turkey)

Ürünler(ton)								
Yıl	Buğday	Arpa	Mısır	Ayçiçeği	Pamuk	Şekerpancarı	Toplam	
2016	20.600.000	6.700.000	6.400.000	1.670.716	2.100.000	19.592.731	57.063.447	
2017	21.500.000	7.100.000	5.900.000	1.964.385	2.450.000	21.149.020	60.063.405	
2018	20.000.000	7.000.000	5.700.000	1.949.229	2.570.000	17.436.100	54.655.329	
2016								
Ürün	Atık	Üretim miktarı(ton/yıl)	Atık katsayısı	Atık miktarı(ton/yıl)	Kullanılabilirlik oranı	Kullanılabilir atık miktarı(ton/yıl)	Birim Isıl değer (MJ/kg)	Toplam Yanma Enerji Değeri (GJ)
Mısır	Sap Koçan	6.400.000	4.04	25.856.000	0.5	12.928.000	17.65	228.179.200
Buğday	Saman	20.600.000	1.63	33.578.000	0.5	16.789.000	17.51	293.975.390
Arpa	Saman	6.700.000	1.12	7.504.000	0.5	3.752.000	17.31	64.947.120
Şeker pancarı	Baş Yaprak	19.592.731	2.06	40.361.025	0.5	20.180.512	18	363.249.232
Ayçiçeği	Sap	1.670.716	0.73	1.219.622	0.5	609.811	18	10.976.604
Toplam								0,961 PJ
2017								
Ürün	Atık	Üretim miktarı(ton/yıl)	Atık katsayısı	Atık miktarı(ton/yıl)	Kullanılabilirlik oranı	Kullanılabilir atık miktarı(ton/yıl)	Birim Isıl değer (MJ/kg)	Toplam Yanma Enerji Değeri (GJ)
Mısır	Sap Koçan	5.900.000	4.04	23.836.000	0.5	11.918.000	17.65	210.352.700
Buğday	Saman	21.500.000	1.63	35.045.000	0.5	17.522.500	17.51	306.818.975
Arpa	Saman	7.100.000	1.12	7.952.000	0.5	3.976.000	17.31	68.824.560
Şeker pancarı	Baş Yaprak	21.149.020	2.06	43.566.981	0.5	21.783.490	18	392.102.830
Ayçiçeği	Sap	1.964.385	0.73	1.434.001	0.5	717.000	18	12.906.009
Toplam								0,991 PJ
2018								
Ürün	Atık	Üretim miktarı(ton/yıl)	Atık katsayısı	Atık miktarı(ton/yıl)	Kullanılabilirlik oranı	Kullanılabilir atık miktarı(ton/yıl)	Birim Isıl değer (MJ/kg)	Toplam Yanma Enerji Değeri (GJ)
Mısır	Sap Koçan	5.700.000	4.04	23.028.000	0.5	11.514.000	17.65	203.222.100
Buğday	Saman	20.000.000	1.63	32.600.000	0.5	16.300.000	17.51	285.413.000
Arpa	Saman	7.000.000	1.12	7.840.000	0.5	3.920.000	17.31	67.855.200
Şeker pancarı	Baş Yaprak	17.436.100	2.06	35.918.366	0.5	17.959.183	18	323.265.294
Ayçiçeği	Sap	1.949.229	0.73	1.422.937	0.5	711.468	18	12.806.434
Toplam								0,892 PJ

Tablo 4’te Türkiye’de en fazla ekim alanına sahip tarım ürünleri olan Mısır, buğday, arpa, şekerpancarı ve ayçiçeğinin atık miktarları gösterilmiştir. Tablo 4’te görüldüğü gibi 2016 yılındaki toplam tarımsal atık miktarı 57.063.447 ton iken, 2017 yılında 60.063.405 ton ve 2018 yılında 54.665.329 ton’dur. Tarımsal atıkların toplam yanma enerji değerine bakıldığında ise, 2016 yılında 0,961 PJ, 2017 yılında 0,991 PJ ve 2018 yılında ise 0,892

PJ'dür. Tablo 4'te görüldüğü gibi 2016-2017 yılları arasında tarımsal atık yanma enerji değeri artarken, 2017-2018 yılları arasında azalarak en düşük 2018 yılında olmuştur. Tarımsal atıkların yakılarak veya gazlaştırılarak kullanılması enerji üretimi açısından iyi bir alternatiftir.. Bu yüzden tarımsal atıkların yanma enerji değerleri atıkların genel yanma enerjisi hesaplarında dikkate alınmıştır.

Tablo 5'te görüldüğü gibi 2014 yılında belediyelerden toplanan atık miktarı 28.010.721 ton iken, 2016 yılında bu değer 31.583.553 ton'a, 2018 yılında ise 32.209.222 ton'a ulaşmıştır. Tablo 5'te görüldüğü üzere 2014 yılında kentsel organik atıkların yakılmasından elde edilen toplam enerji değeri 90,404 PJ iken, 2016 yılında bu değer 101,936 PJ ve 2018 yılında ise 103,955 PJ olarak gerçekleşmiştir. Tablo 5'te görüldüğü gibi Türkiye'de 2014-2018 yılları arasında oluşan kentsel organik atık miktarları ve buna müteakiben hesaplanan yanma enerji değerleri artış göstermiştir. Kentsel organik atıklardan belediyeler tarafından deponi sahasında ortaya çıkan metan gazından elektrik üretimi alternatifi, yakılarak enerji üretilmesi alternatifine göre daha avantajlı olduğu genel yanma enerjisi hesaplamalarında dikkate alınmamıştır. Kentsel organik atıklardan biyogaz üretiminin hesaplanması daha doğru bir yaklaşımdır.

**Tablo 5.** Kentsel Organik Atık Miktarları ve Yanma Enerji Değerleri (Municipal Organic Waste Amounts and Combustion Energy Values in Turkey)

Kentsel Organik Atıklar			
Yıl	Toplanan Belediye Atık Miktarı (ton)	Organik Atık Miktarı (ton)	Organik Atıkların Yanma Enerji Değerleri (PJ)
2014	28.010.721	15.050.160	90,404
2016	31.583.553	16.969.843	101,936
2018	32.209.222	17.306.014	103,955

Tablo 6'da görüldüğü gibi 2016 yılında Türkiye'deki Kereste atıkların toplam ısıl değeri 20,397 PJ iken, 2017 yılında 19,478 PJ ve 2018 yılında 19,692 PJ'dür. Tablo 6'da görüldüğü gibi 2018 yılındaki toplam atık kereste miktarı ve yanma enerji değeri 2017 yılına göre daha fazla iken, 2016 yılında en fazla olmaktadır. Kereste atıklarının yakılarak veya gazlaştırılarak kullanılması enerji üretimi açısından iyi bir alternatiftir.. Bu yüzden kereste atıkların yanma enerji değerleri atıkların genel yanma enerjisi hesaplarında dikkate alınmıştır.

**Tablo 6.** Kereste Atık Miktarları ve Yanma Enerji Değerleri (Timber Waste Amounts and Combustion Energy Values in Turkey)

Kereste Atıkları (FAOSTAT, 2019)					
Yıl	İbrelî Ağaçlardan Üretilen Kereste Miktarı (m <sup>3</sup> )	Yapraklı Ağaçlardan Üretilen Kereste Miktarı (m <sup>3</sup> )	Toplam Üretilen Kereste Miktarı (m <sup>3</sup> )	Toplam Atık Kereste Miktarı (ton)	Kereste Atıklarının Yanma Enerji Değeri (PJ)
2016	5.819.000	2.680.000	8.499.000	2.549.700	20,397
2017	5.604.800	2.511.200	8.116.000	2.434.800	19,478
2018	5.915.000	2.290.000	8.205.000	2.461.500	19,692

Tablo 7'de görüldüğü üzere, Türkiye'deki endüstriyel odun atıklarının toplam yanma enerji değeri 2016 yılında 26,79 PJ, 2017 yılında 24,44 PJ ve 2018 yılında da 30,05 PJ olarak hesaplanmıştır. Tablo 7'de görüldüğü gibi 2016 yılındaki endüstriyel odun atık miktarı 2017 yılına göre daha fazla iken, odun atıklarının miktarının en yüksek olduğu yılın 2018 olduğu görülmektedir. Endüstriyel odun üretimi atıklarının yakılarak veya gazlaştırılarak kullanılması enerji üretimi açısından iyi bir alternatiftir.. Bu yüzden endüstriyel odun üretimi atıklarının yanma enerji değerleri atıkların genel yanma enerjisi hesaplarında dikkate alınmıştır.

Tablo 8'de görüldüğü gibi, Türkiye'deki ahşap bazlı panel atıklarının toplam ısıl değeri 2016 yılında 8,325 PJ, 2017 yılında 8,046 PJ ve 2018 yılında 8,338 PJ olmuştur. Tablo 8'de görüldüğü gibi 2016 yılında Türkiye'de ki ahşap bazlı panel atık miktarı ve yanma enerji değeri 2017 yılından fazla iken, 2018 yılında en fazla olmaktadır. Ahşap bazlı panel atıklarının yakılarak veya gazlaştırılarak kullanılması enerji üretimi açısından iyi bir alternatiftir.. Bu yüzden ahşap bazlı panel atıklarının yanma enerji değerleri atıkların genel yanma enerjisi hesaplarında dikkate alınmıştır.

**Tablo 7.** Endüstriyel Odun Üretimi Atıkları ve Yanma Enerji Değerleri (Industrial Wood Wastes and Combustion Energy Values in Turkey)

Endüstriyel Odun Üretimi Atıkları				
Yıl	Endüstriyel Odun Üretimi (m <sup>3</sup> )	Endüstriyel Odun Üretimi (ton)	Endüstriyel Odun Atık Miktarı (ton)	Endüstriyel Odun Atıklarının Yanma Enerji Değeri (PJ)
2016	17.009.998	5.953.499	2.976.749	26,79
2017	15.521.622	5.432.567	2.716.283	24,44
2018	19.080.137	6.678.047	3.339.023	30,05

**Tablo 8.** Ahşap Bazlı Panel Atıkları ve Yanma Enerji Değerleri (Wood-Based Panel Wastes and Combustion Energy Values)

Ahşap Bazlı Panel Atıkları				
2016				
Ürünler	Üretim Miktarı (m <sup>3</sup> )	Atık Miktarı (ton)	Atıkların Yanma Enerji Değeri (PJ)	
Kontraplak	120.000	30.000	0,24	
Sunta	4.202.000	504.240	4,285	
MDF	5.069.000	447.264	3,80	
Toplam			8,325	
2017				
Ürünler	Üretim Miktarı (m <sup>3</sup> )	Atık Miktarı (ton)	Atıkların Yanma Enerji Değeri (PJ)	
Kontraplak	105.000	26.250	0,21	
Sunta	4.286.000	514.320	4,286	
MDF	4.747.000	417.736	3,550	
Toplam			8,046	
2018				
Ürünler	Üretim Miktarı (m <sup>3</sup> )	Atık Miktarı (ton)	Atıkların Yanma Enerji Değeri (PJ)	
Kontraplak	112.000	28.000	0,224	
Sunta	4.355.000	522.600	4,442	
MDF	4.910.000	432.080	3,672	
Toplam			8,338	

Türkiye’de 2014 yılında evsel arıtma çamurlarının yakılması suretiyle elde edilen toplam ısı değerinin 23,82 PJ’a, 2016 yılında 24,09 PJ’a ve 2018 yılında ise 24,74 PJ’a ulaştığı görülmektedir (Tablo 9). Yani, 2014-2018 yılları arasında Türkiye’de ki arıtma tesislerinde üretilen çamurun hem miktarının hem de organik içeriğinin artması sonucu, bu atıkların yakılması ile elde edilen yanma enerji değerleri de artış göstermiştir. Evsel arıtma çamuru atıklarının yakılarak veya gazlaştırılarak kullanılması enerji üretimi açısından iyi bir alternatiftir.. Bu yüzden arıtma çamuru atıklarının yanma enerji değerleri atıkların genel yanma enerjisi hesaplarında dikkate alınmıştır.

Tablo 10’da ise yakılarak kullanılması enerji üretimi açısından iyi bir alternatif olan atıkların Türkiye’deki enerji değerlerinin genel değerlendirilmesi verilmiştir. Tablo 10’da görüldüğü gibi toplam olarak bakıldığında 2016 yılında Türkiye’deki yakılarak veya gazlaştırılarak kullanılması enerji üretimi açısından iyi bir alternatif olan biyokütle atıkların yanma enerji değeri 174,49 PJ’dür. Aynı değerlendirme 2017 yılı içinde yapıldığında yakılarak kullanılması enerji üretimi açısından iyi bir alternatif olan biyokütle atıkların Türkiye’deki toplam yanma enerji değeri 150,819 PJ oluyor iken, 2018 yılında 184,647 PJ’e artmıştır. Detaylı olarak değerlendirildiğinde tavuk

atıkların yanma enerji değeri zamanla artış göstermişken, diğerleri ortalama aynı değerlerde kalmıştır. Toplam yanma enerji değerine bakıldığında ise 2016-2018 yılları arasında artış göstermiştir.

**Tablo 9.** Arıtma Çamuru Atıkları ve Yanma Enerji Değerleri (Treatment Sludge Wastes and Combustion Energy Values)

Yıl	Arıtma Çamuru Atıkları		
	Deşarj Edilen Kişi Başı Atıksu Miktarı (Lt)	Organik Atık Miktarı (ton)	Organik Atıkların Yanma Enerji Değeri (PJ)
2014	66.065	4.331.820	23,82
2016	66.795	4.380.000	24,09
2018	68.620	4.499.672	24,74

**Tablo 10.** Yanma Enerji Değerlerinin Genel Değerlendirilmesi (General Assessment of Combustion Energy Values)

Atık Biyokütle Kaynakları	Yanma Enerji Değeri (PJ)		
	2016	2017	2018
Tarımsal ve Tavuk Atıklarının Potansiyeli			
Tarımsal Atıklar	0,961	0,991	0,892
Tavuk Atıkları	93,927	97,864	100,935
Ağaç Atıklarının Potansiyeli			
Endüstriyel Odun Üretimi Atıkları	26,79	24,44	30,05
Kereste Atıkları	20,397	19,478	19,692
Ahşap Bazlı Panel Atıkları	8,325	8,046	8,338
Arıtma Çamuru Atıkları	24,09	*	24,74
Toplam	174,49	150,819	184,647

\* TÜİK verisi iki yıl aralıklarla olduğu için 2017 yılı verisine ulaşılamamıştır.

## 5. Sonuç ve Tartışma (Conclusion and Discussion)

Çalışmada, güncel verilere göre hesaplanan yanma enerji değerlerine bakıldığında; son yıllardaki yakılarak kullanılması enerji üretimi açısından iyi bir alternatif olan biyokütle atıkların toplam yanma enerji değerlerinin büyük kısmını tavuk atıklardan kaynaklı yanma enerji değerinin oluşturduğu görülmektedir. Tavuk atıklarından elde edilen yanma enerji değerinden sonra fazla olandan düşüğe doğru sırasıyla, endüstriyel odun üretim atıklarından kaynaklı yanma enerji değeri> arıtma çamuru organik atıklarından kaynaklı yanma enerji değeri> kereste atıklarından kaynaklı yanma enerji değeri > tarımsal atıklardan kaynaklı yanma enerji değeri gelmektedir. Yakılarak kullanılması enerji üretimi açısından iyi bir alternatif olan biyokütle atıkların toplam yanma enerji değerlerinin yılda ortalama yaklaşık %53-55'ini Et tavuğu ve yumurta tavuğunun oluşan tavuk atıklarının toplam yanma enerji değeri oluşturmaktadır. Bu yüzden, gelecekte yapılacak çalışmalarda tavuk atıklarının temiz ve verimli yakılması için gerekli olan teknolojilerin geliştirilmesi ve altyapının oluşturulması Türkiye'de hem sürdürülebilir hem de temiz/ucuz enerji eldesi için önem arz etmektedir.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

## Kaynaklar (References)

- Ballı R., 2005. Forest products markets and marketing, Capacity building in sharing forest and market information, Workshop, Czech Republic.
- Başçetinçelik, A., Öztürk, H. H., Kaya, D., Kaçira, K., Ekinci, K., & Karaca, C. (2006). Türkiye'de biyokütle enerjisi kullanımını geliştirme olanakları. VI: Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 25-26.
- Çağal, F. E. (2009). Biyokütle enerjisi potansiyelinin Türkiye açısından değerlendirilmesi (Doctoral dissertation, Enerji Enstitüsü).
- Dias F. M., Do Nascimento M. F., Martinez-Espinosa M., Lahr F. A. R., Valarelli I. D., 2005. Relation between the compaction rate and physical and mechanical properties of particleboards, Materials Research, 8, 5.
- FAOSTAT, 2019(Son erişim tarihi: 12.01.2020).
- <https://www.iea.org/data-and-statistics>, 2019(Son erişim tarihi: 11.01.2020).
- <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>, 2019(Son erişim tarihi: 02.01.2020).
- <http://www.enerji-dunyasi.com/yayin/356/-aritm-camuru-bir-enerji-kaynagi-olarak-kullanilmali-10051.html#.XdaX6L5R2U1>(Son erişim tarihi: 02.01.2020).
- [https://www.fao.org/regional/SEUR/events/Krtiny/docs/TurM\\_en.pdf](https://www.fao.org/regional/SEUR/events/Krtiny/docs/TurM_en.pdf), accessed on August 2006.
- Karabaş, H. Sakarya İlinin Bitkisel Biyokütle Açısından Atık Miktarının ve Enerji Potansiyelinin Araştırılması. Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, 2(1), 35-43.



- KARAYILMAZLAR, S., SARAÇOĞLU, N., Çabuk, Y., & Rifat, K. U. R. T. (2011). Biyokütlenin Türkiye’de enerji üretiminde değerlendirilmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 13(19), 63-75.
- Kurt, G., & KOÇER, N. N. (2010). Malatya ilinin biyokütle potansiyeli ve enerji üretimi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 26(3), 240-247.
- OLGUN, H., DOĞRU, M., & HOWARTH, C. R. KATI (2000). ATIKLARIN ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNDE KULLANILMASI VE GAZLAŞTIRICILAR.
- Ozturk, H. H., & Bascetincelik, A. (2006). Energy exploitation of agricultural biomass potential in Turkey. *Energy Exploration & Exploitation*, 24(4), 313-330.
- Özcan, M. Öztürk, S., YILDIRIM, M., & KILIÇ, L. (2012). Biyokütle Kaynaklarının Farklı Üretim Teknolojilerine Göre Elektrik Enerjisi Değerlerinin Belirlenmesi Electricity Energy Potential of Different Biomass Sources Based on Different Production Technologies.
- Pulp and paper sludge to energy, 2006. Preliminary assessment of technologies, CANMET energy technology center, Report No: 34, [www.cifq.qc.ca/imports/\\_uploaded/PPsludge.pdf](http://www.cifq.qc.ca/imports/_uploaded/PPsludge.pdf), accessed on August 2006.
- Sahu, P. K., Chakradhari, S., Dewangan, S., & Patel, K. S. (2016). Combustion Characteristics of Animal Manures. *Journal of Environmental Protection*, 7(06), 951.
- Sims R.E.H., 2002. The brilliance of Bioenergy: In business and practice, James and James Ltd, London.
- TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu, 2019(Son erişim tarihi: 05.01.2020) .
- SÖZEN, E., GÜNDÜZ, G., AYDEMİR, D., & GÜNGÖR, E. (2017). Biyokütle Kullanımının Enerji, Çevre, Sağlık ve Ekonomi Açısından Değerlendirilmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 19(1), 148-160.
- T.C. ETKB(Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı), 2019(Son erişim tarihi: 05.04.2020).
- Üçgül, İ., & Akgül, G. (2010). Biyokütle Teknolojisi. *SDÜ Yekarum e-Dergi*, 1(1).
- Yildiz, S., Yaman, C., Demir, G., Ozcan, H. K., Coban, A., Okten, H. E., ... & Goren, S. (2013). Characterization of municipal solid waste in Istanbul, Turkey. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 32(3), 734-739.
- Yorulmaz, S. Y. (2006). Investigation of Emissions and Combustion Kinetics of Waste Wood Samples with Thermal and Spectral Methods (Doctoral dissertation, MSc Thesis: 70-127. Available online Available online <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12607570/index.pdf> (access 30/08/2018)).



## KISMİ YAYILI YÜK ETKİSİNDEKİ NANO KİRİŞLERİN DİNAMİK ANALİZİ

Mustafa ARDA\*

Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Kısmi Yayılı Yük,  
Nano-Kiriş,  
Yerel Olmayan Elastisite,  
Titreşim Analizi,  
Heaviside Fonksiyonu.*

### Öz

Kısmi yayılı yük etkisindeki karbon nanotüp kirişlerin dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Nano kiriş için hareketin yönetici denklemi ve sınır şartları Eringen'in Yerel Olmayan Elastisite Teorisi kullanılarak elde edilmiştir. Kısmi yayılı yük etkisi Heaviside fonksiyonu ile modellenmiştir. Oluşturulan model, nano kirişin parçalara bölünmesiyle elde edilen model sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Nano kiriş titreşim frekansının yerel olmayan parametre, boyutsuz yayılı yük, yükün başlangıç noktası gibi parametrelerle değişimi incelenmiştir. Farklı titreşim frekanslarında çeşitli parametrelerin nano kirişin genlik değerlerine olan etkisi gösterilmiştir. Nano kirişin parçalara ayrılmasıyla artan süreklilik şartı sayısının oluşturduğu yüksek boyutlu matrislerin çözümüne alternatif olarak oluşturulan modelde dört sınır şartıyla çözüme ulaşılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları bakteri veya virüs gibi nano kütle sensörlerinin modellenmesinde kullanılabilir.

## DYNAMIC ANALYSIS OF NANOBEAMS UNDER THE EFFECT OF PARTIAL UNIFORM LOAD

### Keywords

*Partial Uniform Load,  
Nanobeam,  
Nonlocal Elasticity,  
Vibrational Analysis,  
Heaviside Function.*

### Abstract

Dynamic analysis of nanobeams under the effect of partial uniform transverse load has been carried out. Governing equation of motion and boundary conditions have been obtained using Eringen's Nonlocal Elasticity Theory. Partial uniform load effect is modeled with Heaviside function. Present model results have been compared and validated with fragmented model results. Effects of nonlocal parameter, dimensionless uniform load, application point of uniform load to the vibration frequency of nanobeam have been investigated. Effect of various parameters on the amplitude of nanobeam has been shown at different vibration frequencies. Instead of fragmented model which needs extra continuum boundary conditions which leads to increase in size of the matrices, present model needs four boundary conditions. Present study results could be useful at modeling of nano mass sensors like bacteria or virus.

### Alıntı / Cite

Arda, M., (2020). Kısmi Yayılı Yük Etkisindeki Nano Kirişlerin Dinamik Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 417- 428.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Arda, 0000-0002-0314-3950

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	08.01.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	06.04.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	19.04.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

### 1. Giriş (Introduction)

Karbon nanotüpler (KNT), çağımızın popüler ileri fonksiyonel malzemelerdendir. Malzemenin istenilen özelliklerde nano boyutta modellenmesi fikri ilk olarak (Feynman 2011) tarafından ortaya atılmıştır. Iijima'nın (1991) KNT'leri keşfetmesiyle bilim dünyasının nano boyuttaki yapılarla ilgili çalışmaları da artmıştır. Bakteri, virüs gibi çok küçük boyuttaki yaşam formlarının tespitinde nano-kütle sensörleri (Li ve Chou, 2006; Elishakoff, 2013) gibi nano-elektromekanik araçların modellenmesi ve üretimi karbon nanotüplerin gelecekteki uygulamalarından olacağı düşünülmektedir.

\* İlgili yazar / Corresponding author: mustafaarda@trakya.edu.tr, +90-284-226-1217 (1101)

Karbon nanotüplerin mekanik davranışlarının modellenmesinde çeşitli teoriler kullanılmaktadır. Sürekli ortam mekaniği yaklaşımı boyut etkisinden dolayı nano ölçekli yapılarda doğru sonuçlar vermemektedir. Eringen (Eringen ve Edelen, 1972; Eringen, 1983) tarafından önerilen Yerel Olmayan Elastisite Teorisi, klasik sürekli ortam mekaniğinden farklı olarak küçük ölçek ve uzak mesafe etkisini göz önüne almıştır. Eringen, Yerel Olmayan Elastisite Teorisi'ni ayırık model olan Kafes Dinamiği dalga yayılımı sonuçlarıyla kıyaslayarak geçerliliğini sağlamıştır. Bu varsayımıyla ayırık ve sürekli modelleri tek bir model altında bir araya getirmiştir. Yerel olmayan elastisite teorisinin dışında gerinim gradyanları (Hosseini vd., 2017), modifiye gerilme çifti (Mohammad-Abadi ve Daneshmehr, 2014), doublet mekaniği (Gul vd., 2017; Gul ve Aydogdu, 2017; 2018) ve peridinamik (Oterkus vd., 2015) gibi teoriler de kullanılmaktadır.

Karbon nanotüplerin dış yük etkisi altındaki statik ve dinamik davranışıyla ilgili çalışmalar literatürde yer almaktadır. (Dequesnes vd., 2004) karbon nanotüplerin nano-elektromekanik anahtarlama elemanı olarak modellenmesini moleküler dinamik, doğrusal ve doğrusal olmayan kiriş teorilerini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. (Wang ve Shindo, 2006) karbon nanotüplerin statik eğilme ve burkulma problemleri için yerel olmayan elastisite modelini geliştirmişlerdir. (Gong vd., 2008) karbon nanotüplerin statik ve dinamik karakteristiklerini moleküler dinamik kullanarak incelemişlerdir. (Reddy ve Pang, 2008) yerel olmayan Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorilerini yeniden formüle etmişler ve nano-kirişlerin statik eğilme, titreşim ve burkulma problemlerini çeşitli sınır şartlarında incelemişlerdir. (Aydogdu, 2009) ise genel yerel olmayan kiriş teorisini nano-kirişlerin eğilme, burkulma ve titreşimi için oluşturmuştur. (Civalek vd., 2009) karbon nanotüplerin statik eğilme problemini diferansiyel kuadratür metodunu kullanarak çözmüşlerdir. Ankastre-serbest karbon nanotüplerin statik eğilme ve burkulma analizi (Akgöz vd., 2011) tarafından yapılmıştır. Elastik zemin üzerindeki ankastre kirişlerin (Avcar, 2010) ve Winkler zemin üzerindeki fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme özelliklerine sahip kirişlerin dinamik davranışı (Avcar ve Mohammed, 2017) tarafından incelenmiştir. Değişken kesitli kolonların burkulma analizi ise Ritz yöntemi kullanılarak Akgöz (2019) tarafından gerçekleştirilmiştir. Üçgen kesitli karbon nanotüplerin burulma davranışı (Yaylı, 2013) ve karbon nanotüplerin çeşitli sınır şartlarında eksenel titreşimi (Yaylı, 2014) tarafından incelenmiştir.

(Janghorban ve Zare, 2012) fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüplerin eğilme davranışını incelemişlerdir. (Shaban ve Alibeigloo, 2014) elastik ortam içinde yer alan karbon nanotüplerin eğilme ve serbest titreşim analizini üç boyutlu elastisite teorisini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. (Wu vd., 2015) nano-kabloların elastik davranışına yüzey gerilmeleri ve yerel olmayan elastisite etkilerini araştırmışlardır. Akgöz ve Civalek karbon nanotüplerin eğilme analizini modifiye edilmiş gerilme çifti ve uzama gradyanı teorileri (2012) ve elastik ortam etkisiyle birlikte yüksek mertebeden kayma deformasyon teorileri ve modifiye edilmiş uzama gradyanları teorisini (2016) kullanarak incelemişlerdir. Tek katmanlı grafen yapıların eğilme ve titreşim analizi (Demir ve Civalek, 2016) ve gözenekli yapıya sahip nano çubukların zorlanmış titreşim analizi (Akbaş, 2019) tarafından yapılmıştır. Elastik kısıtlarla sınırlandırılmış karbon nanotüplerin burkulma (Yaylı, 2016; Yaylı, 2017) ve titreşim (Yaylı, 2016; 2018) analizleri Yaylı tarafından gerçekleştirilmiştir.

Kısmi yayılı yük etkisi altındaki nano-kirişlerin statik analizi daha önceki çalışmada ele alınmıştı (Arda ve Aydogdu, 2016). Bu makalenin konusu ise kısmi yayılı yük etkisindeki nano-kirişlerin dinamik davranışdır. Kısmi yayılı yük etkisindeki nano-kiriş için hareketin yönetici denklemi ve sınır şartları Hamilton prensibi ve Yerel Olmayan Elastisite Teorisi kullanılarak elde edilecektir. Hareketin yönetici diferansiyel denkleminin çözümü iki farklı analitik yöntem kullanılarak gerçekleştirilecektir. Genellikle bu tür problemlerin çözümünde kullanılan sürekliliğin parçalara ayrılması yöntemiyle birlikte kısmi yayılı yükün Heaviside ağırlık fonksiyonu kullanılarak modellenmesiyle oluşturulan modelin çözümü kullanılacaktır. Nano-kiriş dinamiğinin yerel olmayan parametre, boyutsuz yayılı yük parametresi ve yükün uygulanmaya başlama noktası gibi etkilerle değişimi incelenecektir. Bahsi geçen parametrelerin belirli titreşim frekanslarında nano-kiriş genlik değerine olan etkisi gösterilecektir.

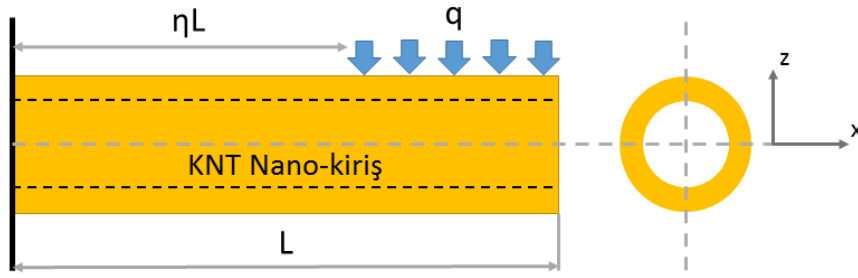
## 2. Analiz (Analysis)

Şekil (1)'de görülen  $L$  uzunluğunda dairesel kesite sahip kısmi yayılı yük etkisi altındaki nano-kiriş ele alınmış olsun. Kirişin  $z$  doğrultusundaki hareketinin yönetici denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$EI \left( \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} \right) = -\rho A \left( \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} \right) - q(x, t) \quad (1)$$

burada  $E$  kirişin elastisite modülünü,  $I$  kirişin atalet momentini,  $\rho$  kirişin yoğunluğunu,  $A$  kirişin kesit alanını,  $w(x,t)$   $z$  doğrultusundaki düşey yer değiştirme fonksiyonunu,  $q(x,t)$  ise kısmi yayılı yükü ifade etmektedir. Şekil (1)'de görülen  $\eta L$  ise yayılı yükün başlangıç noktasını belirtmektedir. Kısmi yayılı yükün tanımı aşağıdaki gibi yapılabilir:

$$q(x, t) = q_0(x)e^{j\omega t} \text{ ve } q_0 = \begin{cases} 0 & \text{eğer } x < \eta L \\ q_0 & \text{eğer } x \geq \eta L \end{cases} \quad (2)$$



**Şekil 1.** Kısmi Yayılı Yük Etkisindeki KNT Nano-Kiriş Modeli (CNT Nanobeam Model under the Effect of Partial Uniform Load)

Eşitlik (1)'de yer alan hareketin yönetici denkleminin çözümü literatürde yer alan çalışmalarda sürekli yapının parçalara ayrılarak her bir parça için hareketin diferansiyel denkleminin ayrı ayrı yazılması ve çözülmesiyle elde edilmektedir. Bu yöntem alternatif olarak kısmi yayılı yükün süreklilik içinde fonksiyonel olarak tanımlanmasıyla hareketin diferansiyel denklemi çözülebilir. Nano-kiriş için hareketin yönetici denklemi Hamilton prensibi ve yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak sonraki bölümde elde edilecektir.

### 2.1. Yerel Olmayan Elastisite Teorisi (Nonlocal Elasticity Theory)

Elastik sürekli ortamın modellenmesine boyut etkisini dahil etmek için yerel olmayan temel bağıntıyı ifade etmek gerekirse (Eringen, 1983; 2004):

$$(1 - \mu \nabla^2) \tau_{kl} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{rr} \delta_{kl} + \frac{E}{(1+\nu)} \varepsilon_{kl} \quad (3)$$

burada  $\tau_{kl}$  ve  $\varepsilon_{kl}$  yerel olmayan gerilme ve gerinme tensörlerini,  $\nu$  Poisson oranını,  $\varepsilon_{rr}$  hacimsel genleşmeyi ( $\varepsilon_{rr} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ ),  $\delta_{kl}$  kroneker delta'yı,  $\mu = (e_0 a)^2$  yerel olmayan parametreyi,  $a$  karakteristik uzunluğu ve  $e_0$  ise Eringen sabitini ifade etmektedir. Eringen  $e_0$  sayısını atomik kafes dinamiği aksenal dalga yayılımı sonuçlarından faydalanarak 0.39 olarak belirlemiştir (Eringen, 2004). (Aydogdu, 2012)  $e_0$  parametresinin aksenal dalga yayılımı için malzeme ve uzunluğa bağlı olduğunu göstermiştir.

Eşitlik (3) bir boyutlu olarak ifade edilirse:

$$\left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \sigma_{xx} = E \varepsilon_{xx} \quad (4)$$

burada  $\varepsilon_{xx}$  aksenal doğrultudaki uzamayı,  $\sigma_{xx}$  ise aksenal doğrultudaki gerilmeyi ifade etmektedir. Nano-kiriş için aksenal kuvvet ve moment bileşikleri yazılacak olursa:

$$N = \int_A \sigma_{xx} dA \quad (5a)$$

$$M = \int_A z \sigma_{xx} dA \quad (5b)$$

burada  $A$  nano-kirişin kesit alanını ifade etmektedir. Kuvvet ve moment bileşikleri, yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak yazılırsa yerel aksenal kuvvet ve moment bileşikleri elde edilir:

$$N - \mu \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = N^L \quad (6a)$$

$$M - \mu \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = M^L \quad (6b)$$

burada  $N^L$  ve  $M^L$  yerel kuvvet ve moment bileşikleridir.

### 2.2. Nano-Kirişin Parçalara Ayrılarak Çözümü (Multisegmented Analysis of Nanobeam)

Nano-kirişin  $z$  doğrultusundaki hareketinin yönetici denklemi ve sınır şartları, Hamilton prensibi kullanılarak elde edilecektir. Nano-kiriş için toplam enerji değişimi Hamilton prensibine göre ifade edilecek olursa (Reddy, 2002):

$$\int_{t_1}^{t_2} [\delta E_W + \delta E_K - \delta E_P] dt = 0 \quad (7)$$

burada  $E_W$  dış kuvvetlerin yaptığı toplam işi,  $E_K$  toplam kinetik enerjiyi ve  $E_P$  toplam potansiyel enerjiyi ifade eder.  $t_1$  ve  $t_2$  sınırları ise varyasyonel analiz yapıldığı zaman aralığını ifade etmektedir. Enerjiler yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak nano-kiriş için yazıldığı takdirde (Adali, 2008):

$$E_W = - \int_{\eta L}^L q w dx - \int_{\eta L}^L \left[ \mu \left( \frac{\partial q}{\partial x} \right)^2 \right] w dx \quad (8a)$$

$$E_K = \int_0^L \rho A \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx + \int_0^L \left[ \mu \rho A \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} \right)^2 \right] dx \quad (8b)$$

$$E_P = \int_0^L EI \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (8c)$$

burada  $I$  nano-kirişin atalet momentini ve  $\rho$  yoğunluğunu ifade etmektedir. Eşitlikler (8a)-(8c), Eşitlik (7)'de yerine yazılırsa:

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_{\eta L}^L \left\{ -q + \left[ \mu \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \right) \right] \right\} \delta w dt dx - \int_{t_1}^{t_2} \left\{ -\mu \left[ \frac{\partial q}{\partial x} \right] \right\} [\delta w(L) - \delta w(\eta L)] dt + \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \left\{ -\left[ \rho A \left( \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) \right] + \left[ \mu \rho A \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} \right) \right] - \left[ EI \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) \right] \right\} \delta w dt dx - \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \left[ EI \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) \right] - \left[ \mu \rho A \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial t^2} \right) \right] \right\} [\delta w(L) - \delta w(0)] dt - \int_{t_1}^{t_2} \left\{ -\left[ EI \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right] \right\} \left[ \frac{\partial \delta w(L)}{\partial x} - \frac{\partial \delta w(0)}{\partial x} \right] dt = 0 \quad (9)$$

Hareketin yönetici denklemi ve sınır şartları  $0 \leq x < \eta L$  ve  $\eta L \leq x \leq L$  aralığı için ayrı ayrı elde edilmelidir:

$$0 \leq x < \eta L \rightarrow -EI \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) = \rho A \left( \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) - \mu \rho A \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} \right) \quad (10a)$$

$$\eta L \leq x \leq L \rightarrow -EI \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) = \rho A \left( \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) - \mu \rho A \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} \right) + q - \mu \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \right) \quad (10b)$$

ve sınır şartları:

$$0 \leq x < \eta L \rightarrow \begin{cases} \left[ EI \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) - \mu \rho A \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial t^2} \right) \right] = 0 \text{ veya } w = 0 \\ \left[ -EI \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right] = 0 \text{ veya } \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (11a)$$

$$\eta L \leq x \leq L \rightarrow \begin{cases} \left[ EI \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) - \mu \rho A \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial t^2} \right) - \mu \left( \frac{\partial q}{\partial x} \right) \right] = 0 \text{ veya } w = 0 \\ \left[ -EI \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right] = 0 \text{ veya } \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (11b)$$

Eşitlik (10a) ve (10b), boyutsuz nano-kiriş uzunluğu ( $\bar{x} = \frac{x}{L}$ ) ve harmonik titreşim ( $w(\bar{x}, t) = W(\bar{x})e^{j\omega t}$ ) varsayımıyla yeniden düzenlenirse:

$$\frac{d^4 W_1}{d\bar{x}^4} + \frac{d^2 W_1}{d\bar{x}^2} \left[ \frac{\mu}{L^2} \Omega^4 \right] - W_1 [\Omega^2] = 0 \quad (12a)$$

$$\frac{d^4 W_2}{d\bar{x}^4} + \frac{d^2 W_2}{d\bar{x}^2} \left[ \frac{\mu}{L^2} \Omega^4 \right] - W_2 [\Omega^2] = -\frac{Q}{\Omega^2} \quad (12b)$$

burada  $W_1$  ve  $W_2$  birinci ve ikinci bölümlere ait yer değiştirme genlik fonksiyonlarını ifade etmektedir.  $j^2 = -1$ ,  $\omega$  titreşim frekansı ve  $t$  ise zamandır.  $\Omega$  boyutsuz frekans parametresini ve  $Q$  boyutsuz yayılı yük parametresini ifade eder ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\Omega = \sqrt{\frac{\rho A \omega^2 L^4}{EI}}, \quad Q = \frac{q_0 L^4}{EI} \quad (13)$$

Eşitlik (12a) ve (12b)'deki diferansiyel denklemlerin genel çözümü aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$W_1(\bar{x}) = C_1 e^{r_1 \bar{x}} + C_2 e^{r_2 \bar{x}} + C_3 e^{r_3 \bar{x}} + C_4 e^{r_4 \bar{x}} \quad (14a)$$

$$W_2(\bar{x}) = C_5 e^{r_1 \bar{x}} + C_6 e^{r_2 \bar{x}} + C_7 e^{r_3 \bar{x}} + C_8 e^{r_4 \bar{x}} - \frac{Q}{\Omega^2} \quad (14b)$$

Eşitlik (14a) ve (14b)'de belirtilen yer değiştirme genlik fonksiyonlarının süreklilik şartını sağlayabilmeleri için yayılı yükün başlangıç noktasında ( $x = \eta L$ ) süreklilik sınır şartları yazılır. Her iki yer değiştirme fonksiyonunun

bu şartları sağlaması gerekir. Nano-kiriş problemi için dört olan sınır şartı sayısı, sürekli yapının ikiye bölünmesiyle dört adet fazladan süreklilik şartı gerektirir. Aşağıda bahsi geçen sekiz sınır şartı belirtilmiştir:

$$x = 0 \rightarrow \begin{cases} W_1(0) = 0 \\ \frac{\partial W_1(0)}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (15a)$$

$$x = \eta L \rightarrow \begin{cases} W_1(\eta L) = W_2(\eta L) \\ \frac{\partial W_1(\eta L)}{\partial x} = \frac{\partial W_2(\eta L)}{\partial x} \\ -EI \frac{\partial^2 W_1(\eta L)}{\partial x^2} = -EI \frac{\partial^2 W_2(\eta L)}{\partial x^2} \\ EI \left( \frac{\partial^3 W_1(\eta L)}{\partial x^3} \right) - \mu \rho A \left( \frac{\partial^3 W_1(\eta L)}{\partial x \partial t^2} \right) = EI \left( \frac{\partial^3 W_2(\eta L)}{\partial x^3} \right) - \mu \rho A \left( \frac{\partial^3 W_2(\eta L)}{\partial x \partial t^2} \right) \end{cases} \quad (15b)$$

$$x = L \rightarrow \begin{cases} -EI \frac{\partial^2 W_2(L)}{\partial x^2} = 0 \\ EI \left( \frac{\partial^3 W_2(L)}{\partial x^3} \right) - \mu \rho A \left( \frac{\partial^3 W_2(L)}{\partial x \partial t^2} \right) = 0 \end{cases} \quad (15c)$$

Eşitlik (15a)-(15c)'de belirtilen sınır ve süreklilik şartları matris formunda yazılırsa doğrusal denklemler sistemi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} & P_{37} & P_{38} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} & P_{46} & P_{47} & P_{48} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} & P_{56} & P_{57} & P_{58} \\ P_{61} & P_{62} & P_{63} & P_{64} & P_{65} & P_{66} & P_{67} & P_{68} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{75} & P_{76} & P_{77} & P_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{85} & P_{86} & P_{87} & P_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{q}{\Omega^2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Burada dikkati çeken husus sürekli yapının her parçalara ayrılma işleminde süreklilik şartının sağlanması için dört adet fazladan süreklilik şartı eklenmektedir. Bu şekilde birden fazla bölgede yayılı yük etkisini modellerken daha fazla süreklilik şartı gerekecek ve katsayılar matrisinin boyutları büyüyecektir. Karmaşık problemlerin modellenmesi ve çözümünde geçen süre artacaktır. Bu nedenle kısmi yayılı yük gibi etkilerin süreklilik içinde modellendiği yöntemler daha kullanışlı olacaktır.

### 2.3. Nano-Kirişin Tek Parça Olarak Çözümü (Analysis of Nanobeam as a Whole)

Eşitlik (8)'de yayılı yükün yaptığı iş ( $\eta L - L$ ) aralığında tanımlanmıştı. Kısmi olan yayılı yük etkisini sürekliliğin tamamında ( $0 - L$ ) tanımlamak için aşağıda belirtildiği şekliyle ifade etmek gerekir:

$$-EI \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) = \rho A \left( \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) - \mu \rho A \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} \right) + qH(x - \eta L) - \mu \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} qH(x - \eta L) \right) \quad (17)$$

burada  $H$ , Heaviside fonksiyonunu belirtmektedir. Bölgesel veya noktasal yayılı yük, kuvvet veya moment gibi etkilerin tanımlanmasında Heaviside ve Dirac Delta fonksiyonları (Civalek vd., 2009) ve Laplace dönüşümleri (Yaylı, 2017) kullanılmaktadır. Statik analizlerde uygulamaları bulunmakla birlikte dinamik modellemelerde kullanımları yaygın değildir (Eftekhari ve Young, 2014; Eftekhari, 2016). Heaviside ve Dirac Delta fonksiyonlarının tanımı ve aralarındaki bağıntı aşağıda belirtilmiştir:

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } x < 0 \\ 1 & \text{eğer } x \geq 0 \end{cases} \quad (18a)$$

$$\delta(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } x \neq 0 \\ \infty & \text{eğer } x = 0 \end{cases} \quad (18b)$$

Heaviside ve Dirac Delta fonksiyonları arasındaki bağıntı aşağıda belirtilmiştir:

$$\frac{d}{dx} H(x) = \delta(x) \quad (19)$$

Dirac Delta fonksiyonunun türevi ise aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$g(x) \left[ \frac{d}{dx} \delta(x) \right] = - \left[ \frac{d}{dx} g(x) \right] \delta(x) \quad (20)$$

burada  $g(x)$  sürekli bir fonksiyonu ifade etmektedir. Bu çalışmada ele alınan problemde  $g(x)$  fonksiyonu olarak sabit yayılı yük ele alınmıştır ve türevi sıfır olur. Mevcut problem için Dirac Delta fonksiyonunun türevi sıfır olarak elde edilir.

Heaviside fonksiyonu kullanılarak yayılı yük etkisi hareketin yönetici denkleminde eklendikten sonra, Eşitlik (17)'deki diferansiyel denklemin genel çözümü aşağıda ifade edildiği gibidir:

$$W(\bar{x}) = C_9 e^{r_1 \bar{x}} + C_{10} e^{r_2 \bar{x}} + C_{11} e^{r_3 \bar{x}} + C_{12} e^{r_4 \bar{x}} - \frac{Q}{\Omega^2} H(\bar{x} - L) \quad (21)$$

İntegrasyon sabitleri nano-kirişin ankastre serbest sınır şartları kullanılarak belirlenir:

$$x = 0 \rightarrow \begin{cases} W(0) = 0 \\ \frac{\partial W(0)}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (22a)$$

$$x = L \rightarrow \begin{cases} -EI \frac{\partial^2 W(L)}{\partial x^2} = 0 \\ EI \left( \frac{\partial^3 W(L)}{\partial x^3} \right) - \mu \rho A \left( \frac{\partial^3 W(L)}{\partial x \partial t^2} \right) = 0 \end{cases} \quad (22b)$$

Yukarıda belirtilen sınır şartları matris formunda yazılırsa Heaviside fonksiyonu değerinin 0 olduğu durumda homojen denklem sistemi, 1 olduğu durumda ise homojen olmayan denklem sistemi elde edilir. İki denklem sistemi de belirli bir titreşim frekansında integrasyon katsayıları için çözümlerse yer değiştirme genlik fonksiyonu tanımlanır.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_9 \\ C_{10} \\ C_{11} \\ C_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Q}{\Omega^2} H(\bar{x} - L) \\ \frac{Q}{\Omega^2} \delta(\bar{x} - L) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Yer değiştirme genlik değerleri parametrik analizde elde edilen en büyük genlik değerine bölünerek normalleştirilmiştir. Sonraki bölümde bahsi geçen genlikler Eşitlik (24)'de belirtildiği şekliyle normalleştirilerek sunulmuştur:

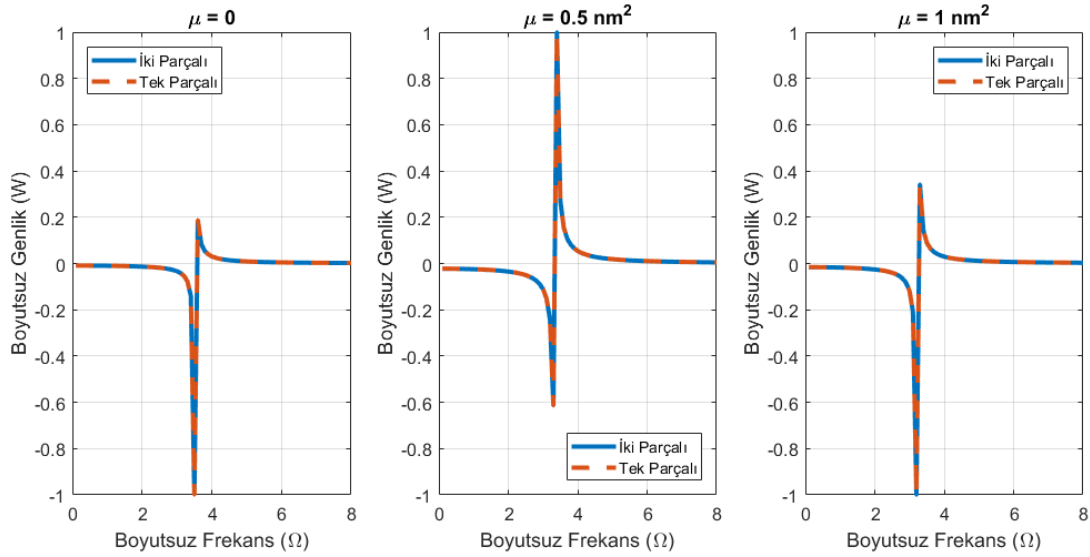
$$\bar{W} = \frac{W}{\text{maksimum}(|W|)} \quad (24)$$

### 3. Sayısal Sonuçlar (Numerical Results)

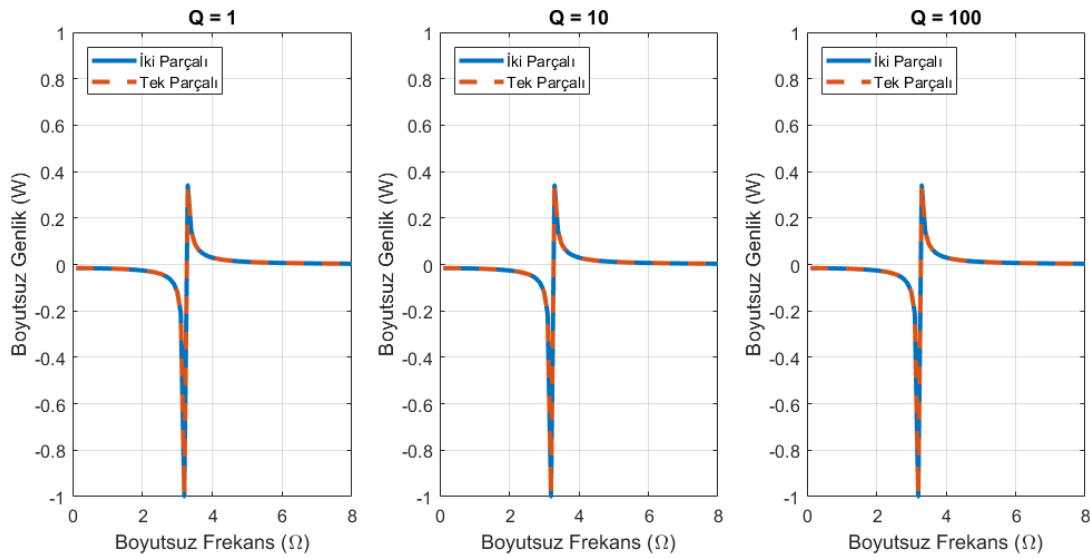
Kısmi yayılı yük etkisindeki nano-kirişin dinamik davranışı bu bölümde incelenecektir. İlk olarak yerel olmayan parametre, boyutsuz yayılı yük parametresi ve yükün uygulanmaya başlandığı noktanın rezonans frekansına olan etkisi incelenecektir. Daha sonra bahsedilen parametrelerin nano-kirişin genlik değerlerine olan etkileri gösterilecektir.

Şekiller 2 ve 3'de yayılı yük etkisiyle zorlanmış titreşim yapan nano-kirişin yer değiştirme genliğinin tahrik frekansıyla değişimi görülmektedir. Ayrıca analiz bölümünde sunulan iki farklı analitik çözümün geçerliliği burada belirtilmiştir. İki ve tek parçalı olarak belirtilen sonuçlar nano-kirişin parçalara bölünmesi ve kısmi yayılı yükün Heaviside fonksiyonu yardımı ile tanımlanmasıyla oluşturulan modellerden elde edilmiştir. Görüldüğü üzere iki model de aynı sonuçları vermektedir. Yerel olmayan ve boyutsuz yayılı yük parametrelerinin etkilerinin dahil edilmesiyle iki model sonuçları arasındaki uyum bozulmamaktadır.

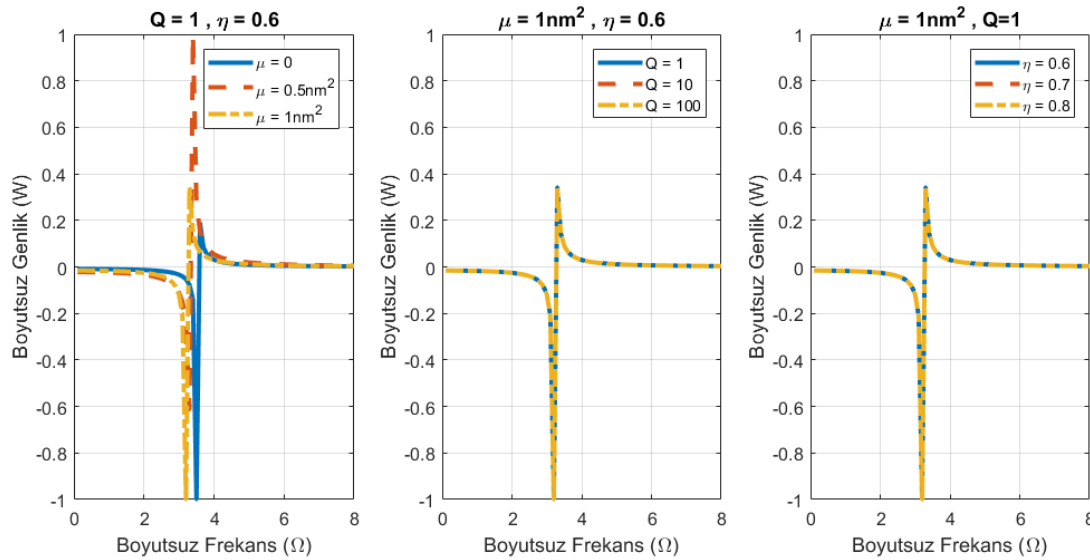
Şekil 4'de dinamik genlik değerinin yerel olmayan parametre, boyutsuz yayılı yük parametresi ve yükün uygulamaya başlama noktası ile değişimi görülmektedir. Bu sonuçlar yayılı yükün Heaviside fonksiyonu kullanılarak sürekli modellendiği yöntemden elde edilmiştir. Yerel olmayan parametre rezonans frekansını azaltmakta ancak yayılı yük parametresi ve yükün başlangıç noktasının rezonans frekansı üzerinde herhangi bir etkisi olmamaktadır. Bu nedenle, Tablo 1'de ilk üç mod frekansının yerel olmayan parametre ile değişimi gösterilmiştir. Dikkat edilirse, yerel olmayan parametrenin sıfır olduğu durumda ( $\mu=0$ ), yayılı yükün tahrik frekansının nano kiriş doğal frekansıyla çakıştığı rezonans frekansı, literatürde (Leissa ve Qatu, 2011) ankastre-serbest kirişlerin Euler-Bernoulli süreklilik mekaniği modeliyle elde edilen sonuçlarla aynıdır. Yerel olmayan etki ile ilk üç mod frekansı azalmakta ve limit değere doğru yaklaşmaktadır (Aydogdu ve Arda 2016). Yayılı yük, Eşitlik (20)'de belirtilen nedenle yerel olmayan etkiye sahip olmadığından, Tablo 1'de verilen sonuçlar üzerinde etkisi yoktur.



**Şekil 2.** Rezonans Frekansının Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ( $Q=1$ ,  $\eta=0.60$ ,  $\bar{x} = 1$ ) (Variation of Resonance Frequency with Nonlocal Parameter)



**Şekil 3.** Rezonans Frekansının Boyutsuz Yayılı Yük Parametresi ile Değişimi ( $\mu=1\text{nm}^2$ ,  $\eta=0.60$ ,  $\bar{x} = 1$ ) (Variation of Resonance Frequency with Dimensionless Distributed Load Parameter)



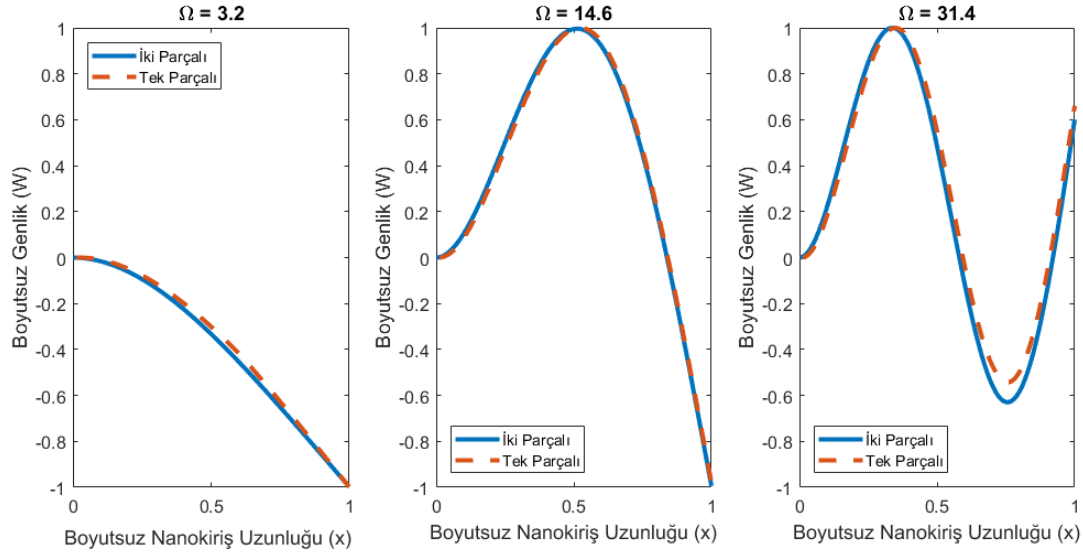
**Şekil 4.** Rezonans Frekansının  $\mu$ ,  $Q$  ve  $\eta$  ile Değişimi ( $\bar{x} = 1$ ) (Variation of Resonance Frequency with  $\mu$ ,  $Q$  and  $\eta$ )



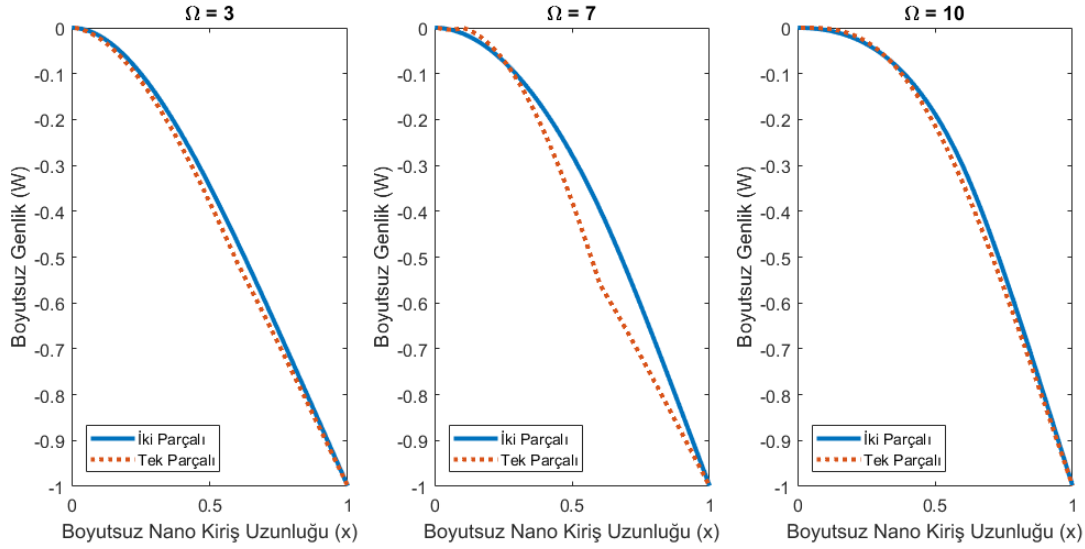
**Tablo 1.** Rezonans Frekanslarının Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ( $\eta=0.6$ ,  $Q=1$ ,  $\bar{x}=1$ ) (Variation of Resonance Frequencies with Nonlocal Parameter)

	$\mu=0$	$\mu=0.5\text{nm}^2$	$\mu=1\text{nm}^2$	$\mu=1.5\text{nm}^2$	$\mu=2\text{nm}^2$
1. Mod	3.516	3.364	3.224	3.104	2.992
2. Mod	22.036	17.152	14.576	12.944	11.796
3. Mod	61.696	39.128	31.380	27.068	24.200

Şekil 5’de nano-kirişin dinamik yer değiştirme genlikleri farklı frekanslarda her iki model için gösterilmiştir. Şekil 2’de olduğu gibi iki model sonuçlarının birbirine yakınlığı görülmektedir. Buna ek olarak tek parçalı modelde ( $\Omega=7$ ) frekansında görülmekte olan genlik değerindeki kırılma yayılı yük etkisiyle ilgilidir. Tıpkı statik analizlerde olduğu gibi dinamik analizlerde de bu davranışın görülmesi tek parçalı modelde yayılı yükün fiziki etkisinin modellendiği şeklinde yorumlanabilir. İki parçalı model bu noktada fonksiyonun sürekliliğini korumaya çalıştığı için tekillikleri gösterememektedir.

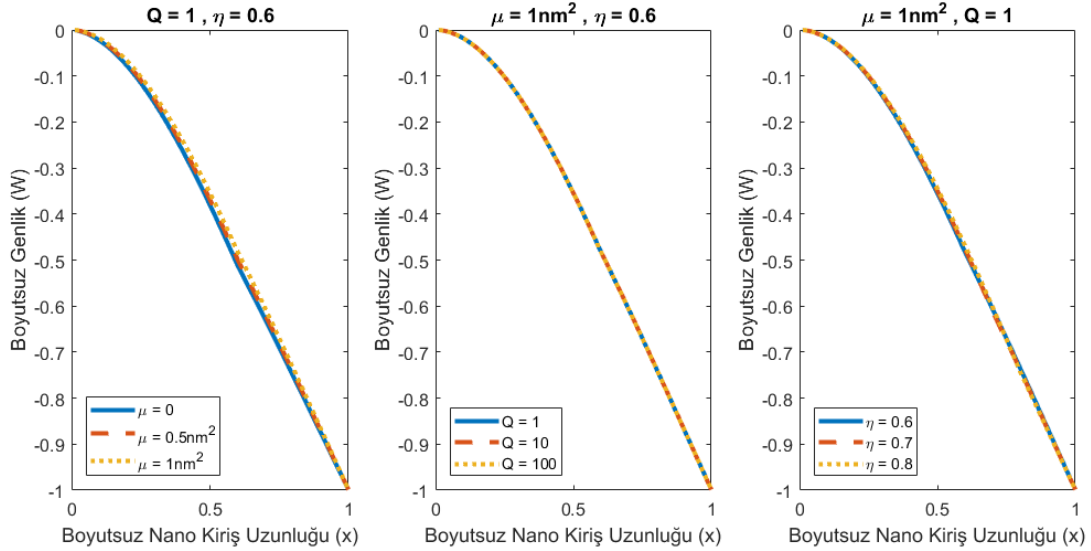
**Şekil 5.** Nano-kirişin Farklı Zorlanmış Titreşim Frekanslarındaki Genlik Değerleri ( $\mu=1\text{nm}^2$ ,  $\eta=0.60$ ,  $Q=1$ ) (Amplitudes of Nanobeam at Various Forced Vibration Frequencies)

Şekil 6’da yerel olmayan elastisite parametresi, boyutsuz yayılı yük parametresi ve yayılı yükün başlangıç noktasının etkisi görülmektedir. En belirgin etki, yerel olmayan elastisite etkisi ile ortaya çıkmaktadır. Gerilme gradyanı etkisiyle nano-kiriş yapısının sertliği ve rezonans frekansı azalmaktadır. Aynı şekilde yumuşama etkisinden dolayı genlik değerleri de yerel olmayan elastisite yaklaşımıyla artmaktadır. Eşitlik (24)’de belirtilen normalleştirme işleminden dolayı yayılı yük değerinin değişmesiyle genliklerde herhangi bir değişim görülmemektedir. Yayılı yükün başlangıç noktası etkisinin ise çok küçük de olsa genliği artırdığı söylenebilir.

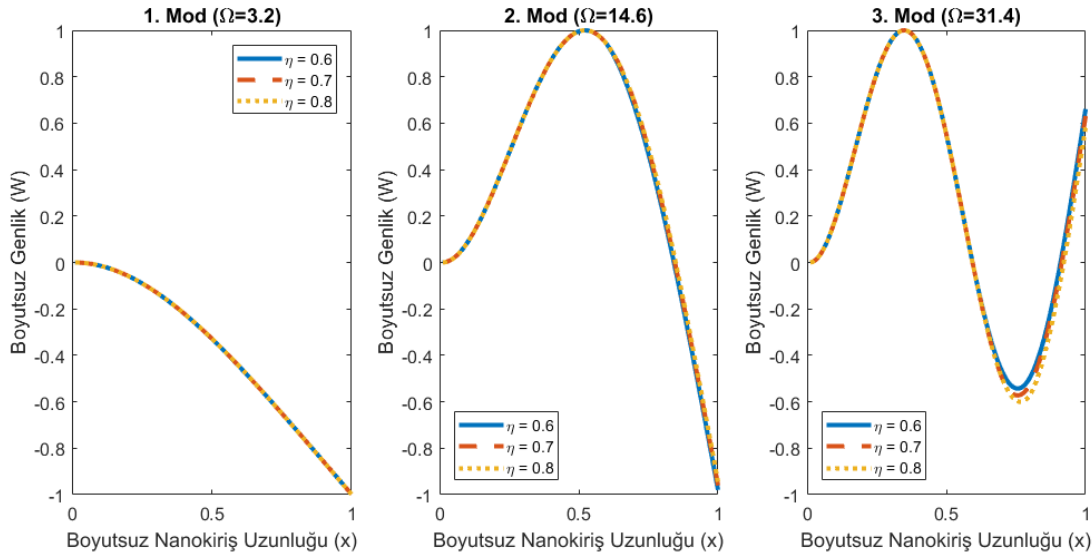


**Şekil 6.** Nano-Kiriş Genlik Değerine  $\mu$ ,  $Q$  ve  $\eta$  Parametrelerinin Etkisi ( $\Omega=3.2$ ) (Effects of  $\mu$ ,  $Q$  and  $\eta$  Parameters to the Amplitudes of Nanobeam)

Şekiller 7 ve 8'de nano-kirişin ilk üç rezonans frekanslarındaki genlik değerleri gösterilmiştir. Şekil 7, iki ve tek parçalı modeller arasındaki uyumu bir kere daha ortaya koymaktadır. Şekil 8'de ise yayılı yükün başlangıç noktasının etkisi görülmektedir. Şekil 6'da belirtildiği üzere birinci rezonans frekansında zorlukla seçilebilen etki üçüncü rezonans frekansında bariz olarak görülmektedir. Özellikle  $\eta$  değerinin arttığı ve yayılı yükün etkisinin sınırlandırıldığı nano-kirişin serbest ucuna doğru maksimum genlik değerleri artış göstermektedir.



**Şekil 7.** Nano-Kirişin İlk Üç Rezonans Frekansındaki Genlik Değerleri ( $\mu=1\text{nm}^2$ ,  $\eta=0.60$ ,  $Q=1$ ) (Amplitudes of Nanobeam at First Three Resonance Frequencies)



**Şekil 8.** Nano-Kirişin İlk Üç Rezonans Frekansındaki Genlik Değerlerine  $\eta$  Etkisi ( $\mu=1\text{nm}^2$ ,  $Q=1$ ) (Effect of  $\eta$  on Amplitudes at First Three Resonance Frequencies of Nanobeam)

#### 4. Sonuç ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmada nano-kirişlere etki eden sürekli olmayan yayılı yük problemlerinde problemin sürekli olarak tanımlanması Heaviside fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. Nano-kiriş için hareketin yönetici denklemi ve sınır şartları Hamilton prensibi ve yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak elde edilmiştir. Hareketin yönetici denkleminin analitik çözümü gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modelin geçerliliği literatürde yer alan parçalara ayırma yöntemiyle karşılaştırılarak sağlanmıştır. Nano-kiriş dinamiğinin yerel olmayan parametre, boyutsuz yayılı yük ve yayılı yükün başlangıç noktası parametreleriyle değişimi incelenmiştir. Farklı rezonans frekanslarında bahsi geçen parametrelerin etkileri incelenmiştir. Yapılan bu çalışma ile elde edilen sonuçları özetlemek gerekirse:

- Literatürde kullanılan parçalara ayırma yöntemi yerine oluşturulan modelin kullanımı daha kolay ve hızlıdır.
- Genlik değerlerindeki yayılı yük etkisi, oluşturulan modelde statik davranışa benzer olarak daha belirgin görülmektedir.
- Yerel olmayan parametre yumuşama etkisiyle rezonans frekansını azaltmakta ve genlik değerlerini artırmaktadır.
- Yayılı yük başlangıç noktasının nano-kiriş serbest ucuna doğru yaklaşması yüksek rezonans frekanslarında genlikleri artırmaktadır.

Bu çalışmanın sonuçları ile bakteri veya virüs gibi nano-kütle sensörlerinin modellenmesi daha kolay ve hızlı olacaktır.

#### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

#### Kaynaklar (References)

- Adali, S., 2008. Variational Principles for Multi-Walled Carbon Nanotubes Undergoing Buckling Based on Nonlocal Elasticity Theory. *Physics Letters A*, 372 (35), 5701-5.
- Akbaş, Ş.D., 2019. Longitudinal Forced Vibration Analysis of Porous a Nanorod. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7 (4), 736-43.
- Akgöz, B., Civalek, Ö., Demir, C., 2011. Buckling Analysis of Cantilever Carbon Nanotubes Using the Strain Gradient Elasticity and Modified Couple Stress Theories. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 8 (9), 1821-27.
- Akgöz, B., Civalek, Ö., 2012. Investigation of Size Effects on Static Response of Single-Walled Carbon Nanotubes Based on Strain Gradient Elasticity. *International Journal of Computational Methods*, 09 (02), 1240032.
- Akgöz, Bekir, 2019. Ritz Yöntemi İle Değişken Kesitli Kolonların Burkulma Analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7 (2), 452-58.
- Akgöz, Bekir, Civalek, Ö., 2016. Bending Analysis of Embedded Carbon Nanotubes Resting on an Elastic Foundation Using Strain Gradient Theory. *Acta Astronautica*, 119 (February), 1-12.

- Arda, M., Aydogdu, M., 2016. Bending of CNTs Under The Partial Uniform Load. *International Journal Of Engineering & Applied Sciences*, 8 (2), 21–21.
- Avcar, M., 2010. Elastik Zemin Üzerinde Bulunan Her İki Ucu Ankastre Mesnetli Rastgele ve Sürekli Homojen Olmayan Kirişin Serbest Titreşimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 1 (1), 33–38.
- Avcar, M., Mohammed, W.K.M., 2017. Winkler Zemin ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme Özelliklerinin Kirişin Frekans Parametrelerine Etkilerinin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5 (3), 573–80.
- Aydogdu, M., 2009. A General Nonlocal Beam Theory: Its Application to Nanobeam Bending, Buckling and Vibration. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 41 (9), 1651–55.
- Aydogdu, M., 2012. Longitudinal Wave Propagation in Nanorods Using a General Nonlocal Unimodal Rod Theory and Calibration of Nonlocal Parameter with Lattice Dynamics. *International Journal of Engineering Science*, 56 (July), 17–28.
- Aydogdu, M., Arda, M., 2016. Forced Vibration of Nanorods Using Nonlocal Elasticity. *Advances in Nano Research*, 4 (4), 265–79.
- Civalek, Ö., Demir, Ç., Akgöz, B., 2009. Static Analysis of Single Walled Carbon Nanotubes (SWCNT) Based on Eringen's Nonlocal Elasticity Theory. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1 (2), 47–56.
- Demir, Ç., Civalek, Ö., 2016. Tek Katmanlı Grafen Tabakaların Eğilme ve Titreşimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4 (3), 173.
- Dequesnes, M., Tang, Z., Aluru, N.R., 2004. Static and Dynamic Analysis of Carbon Nanotube-Based Switches. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 126 (3), 230.
- Eftekhari, S.A., 2016. A Differential Quadrature Procedure with Direct Projection of the Heaviside Function for Numerical Solution of Moving Load Problem. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13 (9), 1763–81.
- Eftekhari, S.A., Young, 2014. A Differential Quadrature Procedure with Regularization of the Dirac-Delta Function for Numerical Solution of Moving Load Problem. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 121241–65.
- Elishakoff, I., Pentaras, D., Dujat, K., Versaci, C., Muscolino, G., Storch, J., Bucas, S., et al., 2012. *Carbon Nanotubes and Nanosensors. Carbon Nanotubes and Nanosensors: Vibration, Buckling and Ballistic Impact*. ISTE. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Eringen, A.C., 1983. On Differential Equations of Nonlocal Elasticity and Solutions of Screw Dislocation and Surface Waves. *Journal of Applied Physics*, 54 (9), 4703–10.
- Eringen, A.C., 2004. *Nonlocal Continuum Field Theories*. Edited by A. Cemal Eringen. New York, NY: Springer New York.
- Eringen, A.C., Edelen, D.G.B., 1972. On Nonlocal Elasticity. *International Journal of Engineering Science*, 10 (3), 233–48.
- Feynman, R.P., 2011. There's Plenty of Room at the Bottom. *Resonance*, 16 (9), 890–905.
- Gong, N., Liang, Y.C., Yao, Y.X., Liu, B.G., 2008. Static and Dynamic Analysis of Carbon Nanotube Cantilever Based on Molecular Dynamics Simulation. *Key Engineering Materials*, 375–376 (August), 631–35.
- Gul, U., Aydogdu, M., 2017. Wave Propagation in Double Walled Carbon Nanotubes by Using Doublet Mechanics Theory. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 93345–57.
- Gul, U., Aydogdu, M., 2018. Structural Modelling of Nanorods and Nanobeams Using Doublet Mechanics Theory. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 14 (2), 195–212.
- Gul, U., Aydogdu, M., Gaygusuzoglu, G., 2017. Axial Dynamics of a Nanorod Embedded in an Elastic Medium Using Doublet Mechanics. *Composite Structures*, 1601268–78.
- Hosseini, M., Gorgani, H.H., Shishesaz, M., Hadi, A., 2017. Size-Dependent Stress Analysis of Single-Wall Carbon Nanotube Based on Strain Gradient Theory. *International Journal of Applied Mechanics*, 9 (6), .
- Iijima, S., 1991. Helical Microtubules of Graphitic Carbon. *Nature*.
- Janghorban, M., Zare, A., 2012. Harmonic Differential Quadrature Method for Static Analysis of Functionally Graded Single Walled Carbon Nanotubes Based on Euler-Bernoulli Beam Theory. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 9633–41.
- Leissa, A.W., Qatu, M.S., 2011. *Vibrations of Continuous Systems*. New York: McGraw-Hill Education.
- Li, C., Chou, T.-W., 2006. Atomistic Modeling of Carbon Nanotube-Based Mechanical Sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17 (3), 247–54.
- Mohammad-Abadi, M., Daneshmehr, A.R., 2014. Size Dependent Buckling Analysis of Microbeams Based on Modified Couple Stress Theory with High Order Theories and General Boundary Conditions. *International Journal of Engineering Science*, 741–14.
- Oterkus, E., Diyaroglu, C., Zhu, N., Oterkus, S., Madenci, E., 2015. Utilization of Peridynamic Theory for Modeling at the Nano-Scale. In , 1–16.
- Reddy, J.N., 2002. *Energy Principles and Variational Methods in Applied Mechanics*. Wiley.
- Reddy, J.N., Pang, S.D., 2008. Nonlocal Continuum Theories of Beams for the Analysis of Carbon Nanotubes. *Journal of Applied Physics*, 103 (2), 023511.
- Shaban, M., Alibeigloo, A., 2014. Three Dimensional Vibration and Bending Analysis of Carbon Nano- Tubes Embedded in Elastic Medium Based on Theory of Elasticity. *Latin American Journal of Solids and Structures*, no. 20052122–40.
- Wang, Q., Shindo, Y., 2006. Nonlocal Continuum Models for Carbon Nanotubes Subjected to Static Loading. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 1 (4), 663–80.
- Wu, Q., Volinsky, A.A., Qiao, L., Su, Y., 2015. Surface Effects on Static Bending of Nanowires Based on Non-Local Elasticity Theory. *Progress in Natural Science: Materials International*, 25 (5), 520–24.
- Yayli, M.Ö., 2016. Buckling Analysis of a Rotationally Restrained Single Walled Carbon Nanotube Embedded In An Elastic Medium Using Nonlocal Elasticity. *International Journal of Engineering & Applied Sciences*, 8 (2), 40–50.
- Yayli, M.Ö., 2013. Torsion of Nonlocal Bars with Equilateral Triangle Cross Sections. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 10 (2), 376–79.
- Yayli, M.Ö., 2014. On the Axial Vibration of Carbon Nanotubes with Different Boundary Conditions. *Micro & Nano Letters*, 9 (11), 807–11.
- Yayli, M.Ö., 2016. A Compact Analytical Method for Vibration Analysis of Single-Walled Carbon Nanotubes with Restrained

- Boundary Conditions. *Journal of Vibration and Control*, 22 (10), 2542–55.
- Yayli, M.Ö., 2017. Buckling Analysis of a Cantilever Single-Walled Carbon Nanotube Embedded in an Elastic Medium with an Attached Spring. *Micro & Nano Letters*, 12 (4), 255–59.
- Yayli, M.Ö., 2018. Torsional Vibration Analysis of Nanorods with Elastic Torsional Restraints Using Non-Local Elasticity Theory. *Micro & Nano Letters*, 13 (5), 595–99.
- Yayli, M.Ö., 2017. Bending Analysis of A Cantilever Nanobeam With End Forces By Laplace Transform. *International Journal Of Engineering & Applied Sciences*, 9 (2), 103–103.



## INVESTIGATION OF FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS PRODUCED WITH SELF COMPACTING AND NORMAL CONCRETE

Salih CENGİZ<sup>1\*</sup>, Mehmet KAMANLI<sup>2</sup>, Alptuğ ÜNAL<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Higher School of Vocational and Technical Sciences, Konya Technical University, Konya, Turkey

<sup>2,3</sup> Civil Engineering Department, Faculty of Engineering and Natural Science, Konya Technical University, Konya, Turkey

### Keywords

*Reinforced Concrete Beams,  
Self-Compacting Concrete,  
Experimental Study,  
Damage Mechanics.*

### Abstract

In the construction industry, which is constantly evolving and open to new technologies, concrete has been used to build constructions and has great importance, but unless enough vibration application during casting process, occur gaps between the concrete components, therefore the physical and mechanical properties of concrete cannot be forecasted accurately. Self-compacting concrete does not require vibration or compaction, it saves workmanship and time, and has high performance. Because of less workmanship and shorter production time, the self-compacting concretes offer the possibility of making the construction more economical. In this study, the flexural behavior of the reinforced concrete beams produced with self-compacting and normal concrete were investigated in terms of damage mechanics. Flexural behavior, shear capacity, energy absorption capacity and fracture type of both concrete types was investigated and results were compared. Variables of the samples are the ratio of the stirrup, and the concrete type. Totally 8 pieces of 1/2 scale beams used in this study. The specimens tested with 4-point bending test. When all the results were examined, it was observed that the beams produced with self-compacting concrete consumed more energy.

## KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN VE NORMAL BETON İLE ÜRETİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

### Anahtar Kelimeler

*Betonarme Kiriş,  
Kendiliğinden Yerleşen Beton,  
DeneySEL Çalışma,  
Hasar Mekaniği.*

### Öz

Sürekli gelişen ve yeni teknolojilere açık olan inşaat endüstrisinde beton, inşaatlar için kullanılmıştır ve büyük önem taşımaktadır, fakat döküm işlemi sırasında yeterli titreşim uygulaması yapılmazsa, beton bileşenler arasında boşluklar oluşur, bu nedenle betonun fiziksel ve mekanik özellikleri doğru bir şekilde tahmin edilemez. Kendiliğinden yerleşen beton, titreşim veya sıkıştırma işlemi gerektirmez, işçilik ve zaman tasarrufu sağlar ve yüksek performansa sahiptir. Daha az işçilik ve daha kısa döküm süresi nedeniyle, kendiliğinden yerleşen betonlar inşaatı daha ekonomik hale getirme imkanı sunar. Bu çalışmada, kendiliğinden yerleşen ve normal beton ile üretilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışları hasar mekaniği açısından incelenmiştir. Her iki beton türünde eğilme davranışı, kayma kapasitesi, enerji yutma kapasitesi ve kırılma tipi araştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Numunelerin değişkenleri etriye aralığı ve beton tipidir. Bu çalışmada toplam 8 adet 1/2 ölçekli kiriş kullanılmıştır. Numuneler 4 noktalı eğilme düzeneği ile test edilmiştir. Tüm sonuçlar incelendiğinde, kendiliğinden yerleşen betonla üretilen kirişlerin daha fazla enerji tükettiği gözlenmiştir.

### Alıntı / Cite

Cengiz, S., Kamanlı, M., Ünal, A., (2020). Investigation of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Produced with Self Compacting and Normal Concrete, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(2), 429-438.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Cengiz, 0000-0003-1571-7488  
M. Kamanlı, 0000-0003-3708-3084  
A. Ünal, 0000-0003-2945-8325

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	08.01.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	04.04.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	04.04.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.06.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: scengiz@ktun.edu.tr, +90-332-223-2368

## 1. Introduction

Self-compacting concretes (SCC) are defined as concrete which has the ability to move into the mold with its own weight without the need for any external effect (vibration etc.) and to pass through between steel rebars without decomposition. The SCC were first developed in Japan in the late 1980s to produce underwater concrete applications. The first presentation on SCC was made by Ozawa in 1989 at the East Asia and Pacific Conference on Structural Engineering. The same presentation was held in 1992 at the CANMET & ACI International Conference in Istanbul. This has accelerated the expansion of SCC into the world. After the ACI workshop in Bangkok in 1994, SCC attracted the attention of engineers and researchers, and became widespread in USA and Canada with the ACI Autumn Congress held in New Orleans in 1996. As a result, in the last years of the 20th century it became widespread all over the world and the researches on SCC intensified (Okamura ve Ouchi, 1999; Topçu vd., 2008).

There are many experimental and theoretical researches in the literature about self-compacting concrete. However, the researchers used only concrete samples instead of a reinforced concrete system. Therefore, the effect of the physical and mechanical differences of the self-compacting concrete on the reinforced concrete systems used in buildings cannot be fully understood. In this study, the differences between self-compacting concrete and normal concrete in reinforced concrete beams were investigated (Kumar ve Roy, 2018; Altın vd., 2006).

Beams, being an important part of structure support system, transfer loads from structural elements like floor and loads directly coming upon them to columns. Fracture mechanism that may occur on beams against loads affecting structures is quite important in terms of building behaviour. That's why, beam elements should be tested under various loads. Many studies have been made about beams in literature. Beam behavior under various loads has been tried to be identified (Kamanlı, 1999; Kamanlı and Ünal, 2016; Ünal and Kamanlı, 2016; Spadea et al., 2015; Queshta et al., 2015, Ünal et al., 2018; Ahmad et al., 2017; Jindal et al., 2019; Kamal et al., 2018; Mahmud et al., 2018; Niewiadomski et al., 2018; Pajak, 2016; Pajak and Ponikiewski, 2017; Avcar and Mohammed, 2017; Avcar, 2010)

4 pieces of 1/2 scale specimens were tested to be able to identify real beam behavior within the scope of this study. Test elements were tested on 4-point loading mechanism. Under the experimental studies, one test element without stirrup, one with  $\phi 6/200$  mm stirrup, one with  $\phi 6/100$  mm stirrup, and one with  $\phi 6/50$  mm stirrup were tested to research about the stirrup effect on beams. Load-displacement graphs about test elements tested were drawn and interpreted. Interpretations were made about beam behavior by examining fractures occurring during tests.

## 2. Material and Method

Within the scope of this study, four 1/2 scale beam specimens were tested on 4-point loading mechanism. Experimental studies were conducted in Konya Technical University Earthquake Laboratory. The loading mechanism designed is shown in Fig. 1. Loading is done with the help of hydraulic cylinder fixed to the steel profiles. A load cell was put at the end of hydraulic cylinder in order to identify loads given to the beam. Load cell was fixed to a loading beam made of steel profiles. Loading points were identified by putting miller on specific points of the beam. The length of the loading point/effective depth ratio was considered as  $(a/d)=3$  while identifying loading points.

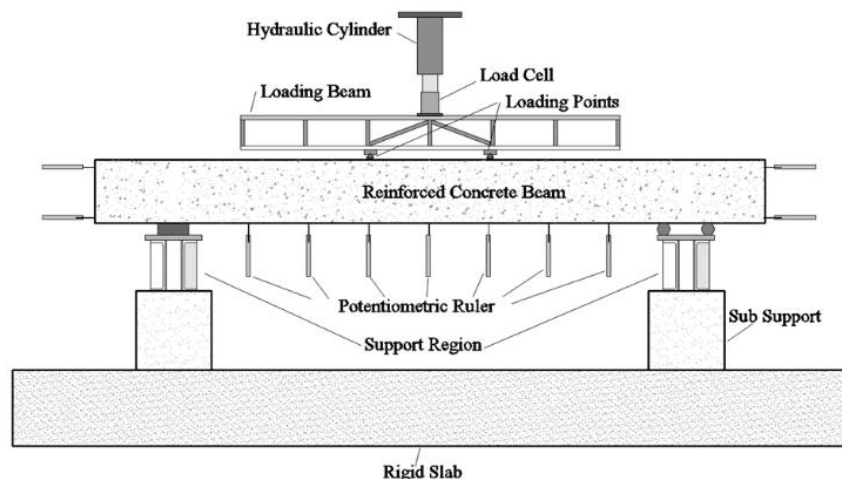


Figure 1. Test Setup

Test elements were produced in the same size and properties. The differences between them are the stirrup ratio and concrete type. Test elements were produced 2500 mm in length. The distance between beam support points was 2000 mm. Beam cross-section was designed as 125-250 mm. 3 $\phi$ 8 mm longitudinal reinforcement was used on beams.

The concretes class was chosen as C60 and reinforcement class as S420. Compressive strength of concretes and properties of beam samples are shown in Table 1 and Table 2.

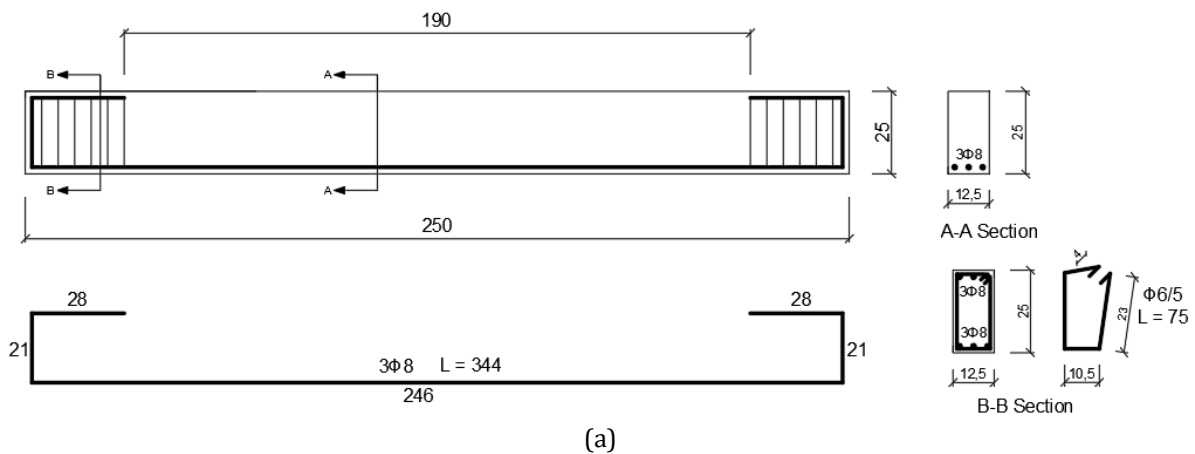
**Table 1.** Compressive strength of concretes

Concrete Samples				
No	Normal		Self Compacting	
	Cube Strength (Mpa)	Average Cube Strength (MPa)	Cube Strength (MPa)	Average Cube Strength (MPa)
1	77.40	73.11 (C60/75)	74.40	73.41 (C60/75)
2	75.06		74.92	
3	66.87		70.90	

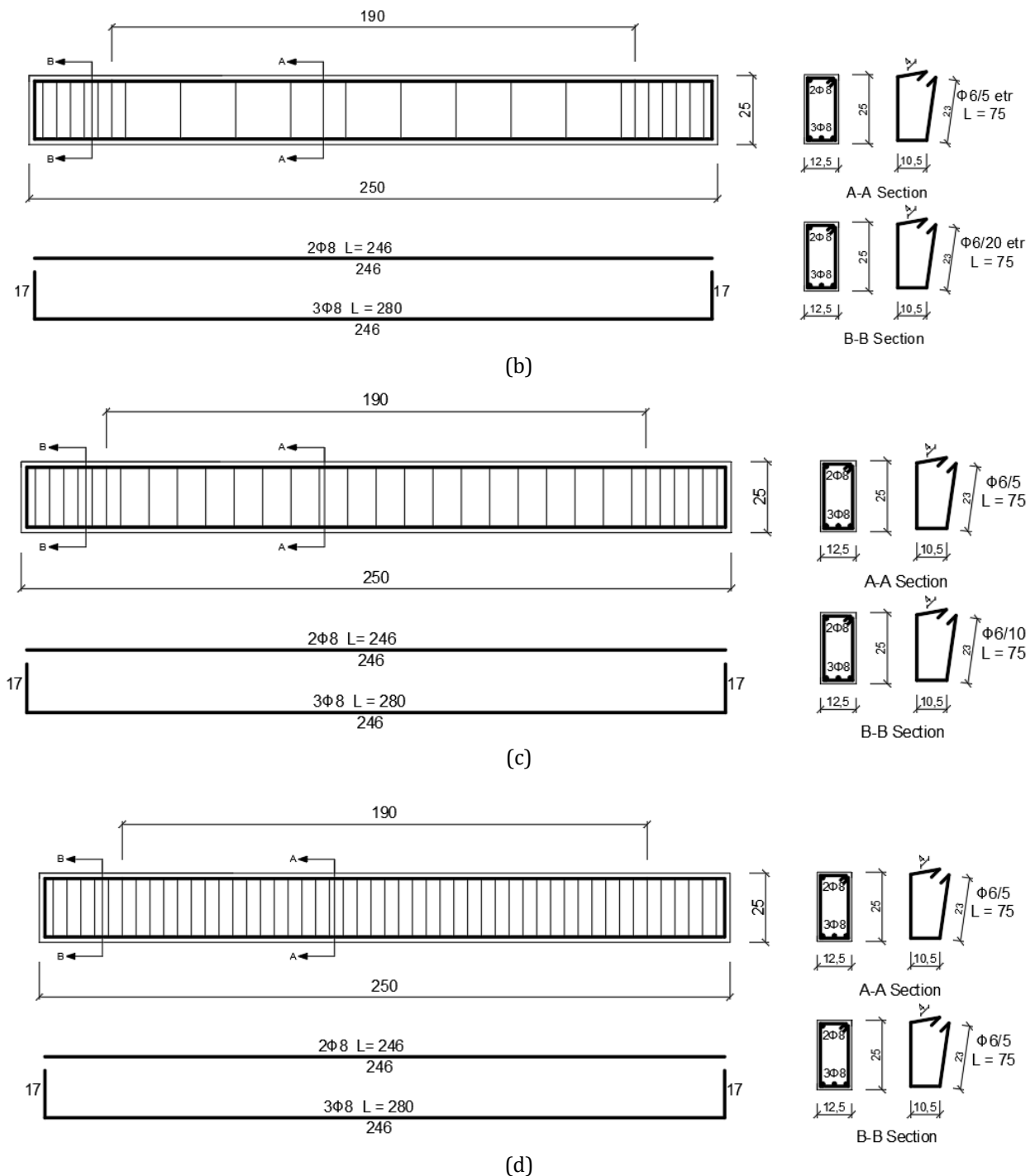
**Table 2.** Properties of beam samples

Beam No	Concrete Type	Stirrup Spacing
B-1	Normal	-
B-2	Normal	200 mm
B-3	Normal	100 mm
B-4	Normal	50 mm
B-5	Self Compacting	-
B-6	Self Compacting	200 mm
B-7	Self Compacting	100 mm
B-8	Self Compacting	50 mm

Size and reinforcement properties of test elements are shown in Fig. 2.







**Figure 2.** Reinforcement rebar detailing (all lengths are cm)  
 (a): without stirrup, (b): 200 mm spacing, (c): 100 mm spacing, (d): 50 mm spacing

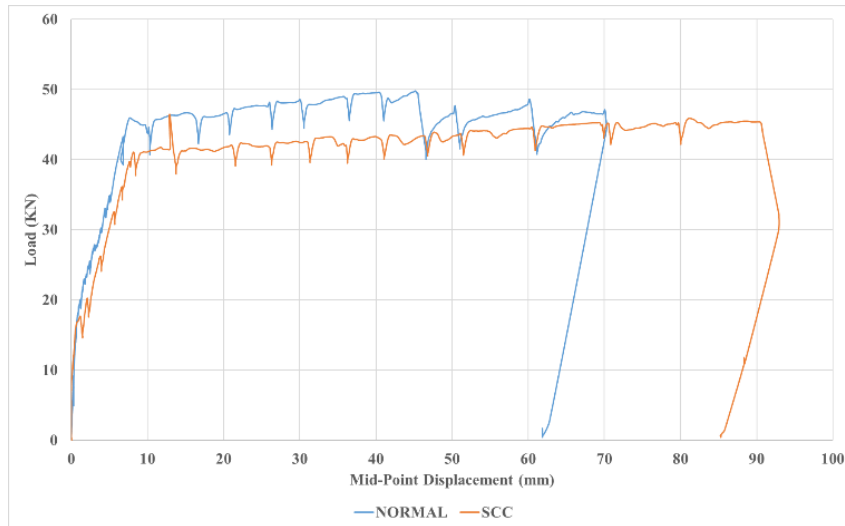
### 3. Results

Experimental studies within the scope of this study were made in Konya Technical University Earthquake Laboratory. Tests were subjected to 4 point bending test. Tests started with load control and continued with displacement control after nominal current value. 5 kN load increments and 5 mm displacement increments were experimented in the tests.

The first crack in the B-1 test element occurred at about 25 kN load value and in the B-5 test element occurred at about 17 kN load. While yield in the B-1 test element occurred at 45 kN load value and 10.00 mm displacement value, in the B-5 test element occurred at 42 kN load and 13.76 mm. Maximum load was measured as 50 kN for B-1 test element and 45.8 kN for B-5. Mid-point displacement at maximum load was measured as 45.37 mm in the B-1, 81.39 mm in the B-5. Shear fracture occurred after maximum load and the amount of load was decreased

suddenly. Load-displacement graph of the test element is shown in Fig. 3. Fractures on the test elements that occurred at the end of the test are shown in Fig. 4 and Fig. 5.

The first crack in the B-2 test element occurred at about 20 kN load value and in the B-6 occurred at about 16 kN. While yield in the B-2 test element occurred at 42 kN load value and 10.28 mm displacement value, in the B-6 occurred at 40 kN load and 13.14mm. Maximum load was measured as 51.5 kN for B-2 test element and 50.0 kN for B-6. Mid-point displacement at maximum load was measured as 85.65 mm in the B-2 and 120.0 in the B-6. The test was ended after reaching the maximum load because of reaching the maximum capacity of the loading mechanism. Load-displacement graph of the test element is shown in Fig. 6. Fractures on the test element that occurred at the end of the test are shown in Fig. 7 and Fig. 8.



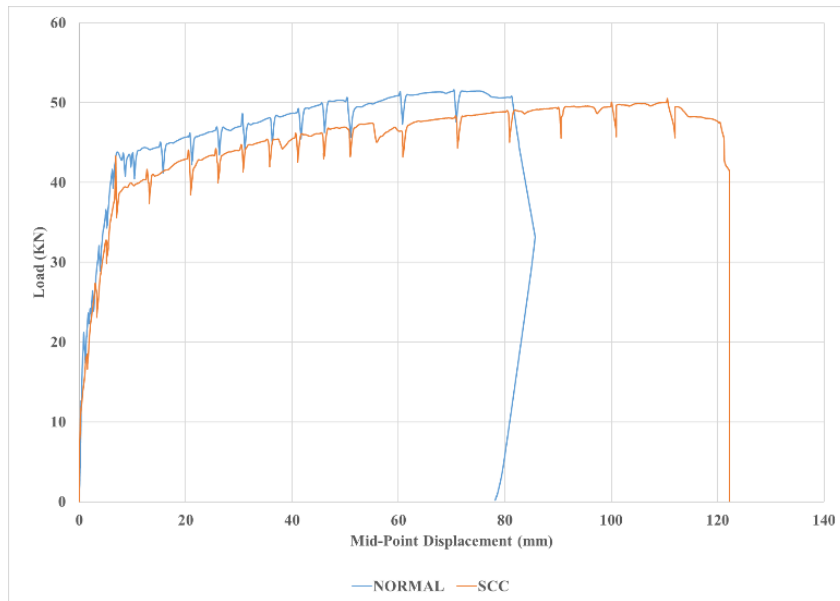
**Figure 3.** Load-Displacement Curve (B-1 and B-5)



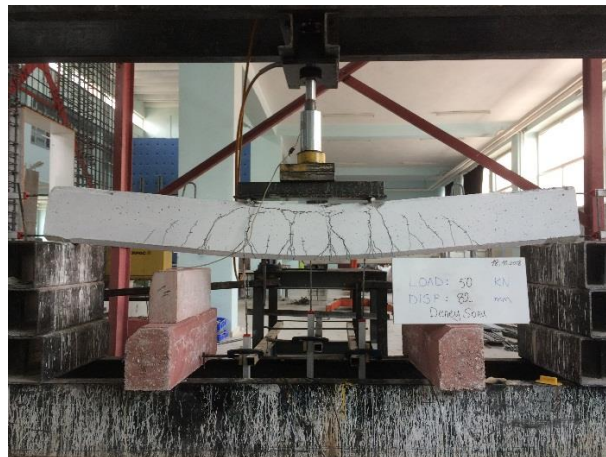
**Figure 4.** Fractures in specimen (B-1)



**Figure 5.** Fractures in specimen (B-5)



**Figure 6.** Load- Displacement Curve (B-2 and B-6)

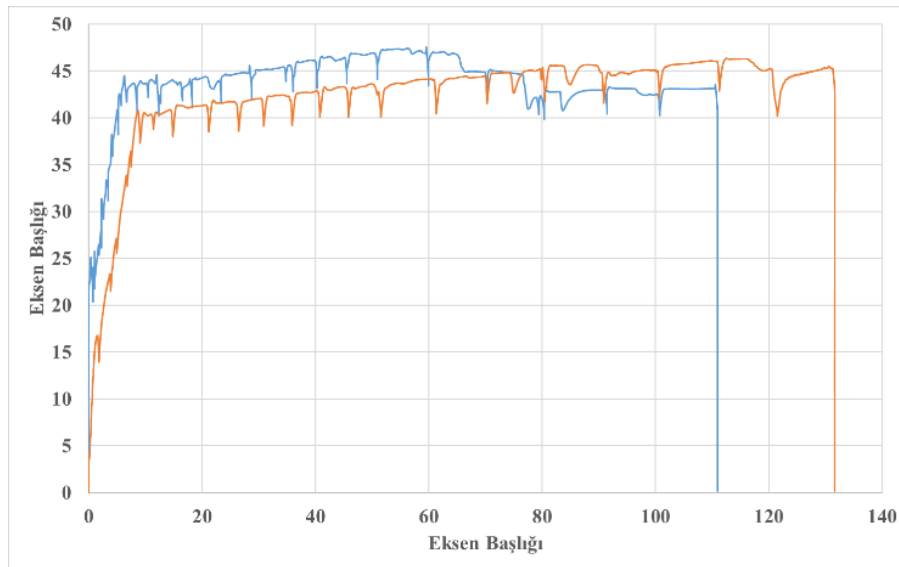


**Figure 7.** Fractures in specimen (B-2)



**Figure 8.** Fractures in specimen (B-6)

The first crack in the B-3 test element occurred at about 25 kN load value and in the B-7 occurred at about 17 kN. While yield in the B-4 test element occurred at 46 kN load value and 12.00 mm displacement value, it occurred in the B-6 at 42 kN load and 13.00 mm. Maximum load was measured as 53.17 kN for B-3 test element, and 46.82 for the B-7. Mid-point displacement at maximum load was measured as 121.8 mm in the B-3 and 102.58 in the B-8. The test was ended after reaching the maximum load because of reaching the maximum capacity of the loading mechanism. Load-displacement graph of the test element is shown in Fig. 9. Fractures on the test element that occurred at the end of the test are shown in Fig. 10 and Fig. 11.



**Figure 9.** Load- Displacement Curve (B-3 and B-7)



**Figure 10.** Fractures in specimen (B-3)



**Figure 11.** Fractures in specimen (B-7)

The first crack in the B-4 test element occurred at about 25 kN load value and in the B-6 occurred at about 17 kN. While yield in the B-4 test element occurred at 46 kN load value and 12.00 mm displacement value, it occurred in the B-6 at 42 kN load and 13.00 mm. Maximum load was measured as 53.17 kN for B-4 test element, and 46.82 for the B-6. Mid-point displacement at maximum load was measured as 121.8 mm in the B-4 and 102.58 in the B-8. The test was ended after reaching the maximum load because of reaching the maximum capacity of the loading

mechanism. Load-displacement graph of the test element is shown in Fig. 12. Fractures on the test element that occurred at the end of the test are shown in Fig. 13 and Fig. 14.

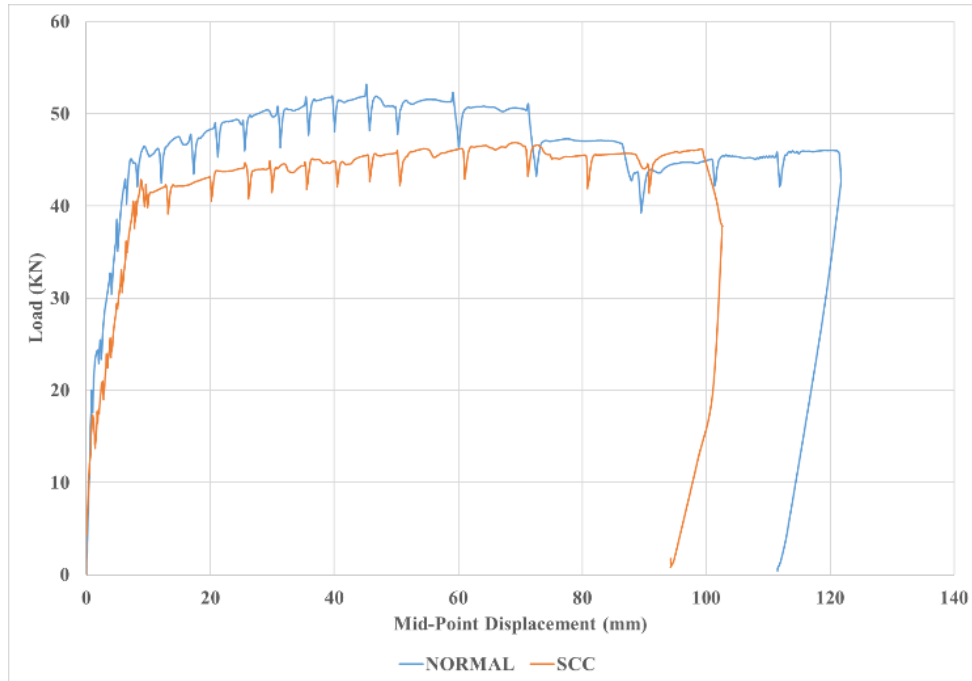


Figure 12. Load- Displacement Curve (B-4 and B-8)



Figure 13. Fractures in specimen (B-4)



Figure 14. Fractures in specimen (B-8)

#### 4. Discussion

The purpose of this study was to examine the concrete type effect on 1/2 scale reinforced concrete beams. For this purpose, four test elements produced and tested on 4 point beam flexural mechanism.

The first crack value in normal concretes was occurred at higher loads than SCC (Fig. 3-6-9-12). These loads in B-1 is %47 higher than B-5, in B-2 is %33 higher than B-6, in B-3 is %56 higher than B-7 and in B-4 is %41 higher than B-8 test element. These results show that the SCC's tension strength is lower than normal concrete.

Although the yield point load in all normal concretes is higher than SCC, the mid-point displacement values are lower at this time. These results show that the SCC is less rigid than normal concrete.

The energy absorption capacity of all the SCC beams except for B-8 beam is higher than the normal concrete (Fig. 3-6-9-12). These results show that the SCC is more ductile than normal concrete.

#### 5. Conclusion

According to the results of this study, self compacting concretes can be used in earthquake resistant building design due to their properties. Because the enough level ductile structural elements more dampers the earthquake force. SCC is more useful than normal concrete due to their easy placement and technical advantages.

The load values in the first crack formed in the beams produced with SCC were lower than those produced with NC.

Tension reinforcement in all samples reached yield point at an average load of 42 kN. Displacement values at the same point gave similar results.

The maximum load value of NC beams is higher than that of SCC. It is concluded that this situation occurs because the amount of coarse aggregate in NC-produced beams is considerably higher than the amount of coarse aggregate in SCC-produced beams.

The beams produced with SCC consumed much more energy than those produced with NC. The ability to consume energy, which is an important feature in earthquake resistant structure design, is greater in SCC.

In general, as the stirrup spacing decreases, the beams make more displacement and consequently the energy consumed increases. Therefore, it is very important for the behavior of the beams to have a suitable range of stirrups.

In this study, the behavioral properties of SCC reinforced concrete beams generated similar results with NC produced concrete beams. Furthermore, SCC is more advantageous than NC structures due to its advantages such as fast production, easy placement, no gaps, smooth surface structure etc.

#### Acknowledgments

The authors would like to thank the Scientific Research Projects (KTUN-BAP-18201111-Konya, Turkey) of Konya Technical University Coordinating Office for financial support. This study was prepared from master thesis of Salih Cengiz with the advisor of Mehmet Kamanli.

#### Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

#### References

- Ahmad, S., A. Umar, and A. Masood. (2017). Properties of normal concrete, self-compacting concrete and glass fibre-reinforced self-compacting concrete: an experimental study. *Procedia engineering*, 173: p. 807-813.
- Avcar, M. (2010). Elastik Zemin Üzerinde Bulunan Her İki Ucu Ankastre Mesnetli Rastgele ve Sürekli Homojen Olmayan Kirişin Titreşim Analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 1 (1) , 33-38.
- Avcar, M , Mohammed, W . (2017). Winkler Zemin ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme Özelliklerinin Kirişin Frekans Parametrelerine Etkilerinin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* , 5 (3) , 573-580 . Doi: 10.21923/jesd.348875

- H. Okamura ve M. Ouchi, (1999). Self Compacting Concrete Development, Present and Future. 1st International Rilem Symposium on Self Compacting Concrete, Sweden.
- İ. B. Topçu, T. Bilir ve H. Baylavlı. (2008). Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, cilt 21, no. 1.
- Jindal, A., G. Ransinchung, and P. Kumar. (2019). Behavioral study of self-compacting concrete with wollastonite microfiber as part replacement of sand for pavement quality concrete (PQC). International Journal of Transportation Science and Technology.
- Kamal, M., Safan M. A., Bashandy A. A. (2018). Experimental investigation on the behavior of normal strength and high strength self-curing self-compacting concrete, Journal of Building Engineering. 16: p. 79-93.
- Kamanli, M. (1999). Değişken Kesitli Kirişlerin Davranışının Teorik Ve Deneysel Olarak İncelenmesi. PhD. Thesis, Graduate School of Natural Sciences, Civil Engineering, Selcuk University, Konya, Turkey.
- Kamanli, M., Unal, A. (2016). Experimental Study on Shear Behavior of Simply Supported Full Scaled Reinforced Concrete Beams. 2nd International Conference on Science, Ecology and Technology (ICONSETE-2016), Barcelona, Spain.
- M. Altın, M. T. Çöğürücü ve M. S. Döndüren. (2006). Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dayanım Özellikleri İçin Deneysel Bir Çalışma. Journal of Selcuk-Technic, cilt 5, no. 3, pp. 77-88.
- Mahmod, M., A.N. Hanoon, and H.J. Abed. (2018). Flexural behavior of self-compacting concrete beams strengthened with steel fiber reinforcement. Journal of Building Engineering. 16: p. 228-237.
- Niewiadomski, P., J. Hoła, and A. Ćwirzeń. (2018). Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 18(3): p. 877-886.
- P. Kumar ve R. Roy. (2018). Study and Experimental Investigation of Flow and Flexural of Natural Fiber Reinforced Self Compacting Concrete. 6th International Conference on Smart Computing and Communication, ICSCC 2017, Kurukshetra, India.
- Pajağ, M. (2016). Investigation on flexural properties of hybrid fibre reinforced self-compacting concrete. Procedia engineering. 161: p. 121-126.
- Pajağ, M. and T. Ponikiewski. (2017). Experimental investigation on hybrid steel fibers reinforced self-compacting concrete under flexure. Procedia engineering. 193: p. 218-225.
- Unal, A., Kamanli, M. (2016). Investigation of Stirrup Effect on Shear Behavior of Fixed Supported Reinforced Concrete Beams. 2nd International Conference on Science, Ecology and Technology (ICONSETE-2016), Barcelona, Spain.
- Unal A., Kamanli, M., Cengiz, S. (2018). Effect of Stirrup Ratio on the Shear Behavior of 1/2 Scale RC Beams, International Journal of Structural and Civil Engineering Research, Vol. 7, No. 4, November.
- Spadea, G., Bencardino, F., Sorrenti, F., Swamy, R. N. (2015). Structural effectiveness of FRP materials in strengthening RC beams. Engineering Structures, 99, 631-641.
- Qeshta, I.M.I., Shafigh, P., Jumaat, M. Z. (2015). Flexural behaviour of RC beams strengthened with wire mesh-epoxy composite. Construction and Building Materials, 79, 104-114.



## AFYON-SANDIKLI JEOTERMAL ALANINDA DÜŞEY ELEKTRİK SONDAJ (DES) ARAŞTIRMASI VE KUYULARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

M.Nuri DOLMAZ<sup>1</sup>, Bilal ŞAHİN<sup>2</sup>, H. Evrim TÜTÜNSATAR<sup>3\*</sup>, Çağlayan BALKAYA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye

<sup>3</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Gönen Meslek Yüksekokulu, Gönen/Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Sandıklı,  
Jeotermal,  
Modelleme,  
Elektrik Özdirenç.

### Öz

Afyonkarahisar ili Sandıklı ilçe sınırları içerisindeki bir alanın jeotermal potansiyelinin araştırılması amacı ile bir elektrik özdirenç çalışması gerçekleştirilmiştir. Schlumberger elektrot dizilimi kullanılarak düşey elektrik sondajı (DES) tekniği ile toplanan toplam 6 adet veri kümesi bir ve iki boyutlu (1B ve 2B) modellenmiştir. 1B'li modellemede sönümlü en-küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Düzgünlük-kısıtlı doğrusallaştırılmış en-küçük kareler iyileştirmesine dayanan 2B'li modellemede yaklaşık K-G doğrultulu bir profil üzerinde toplam 6 DES noktası değerlendirilmiştir. Böylece jeolojik formasyonların yanal ve düşey yöndeki uzanımları, yeraltındaki su içeriği ve düşük özdirençli zonlar belirlenerek çalışma alanının jeotermal potansiyeli ortaya konmuştur. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, alandaki 15 ohm.m'den düşük özdirenç değerleri gösteren bölgelerde sondajlar önerilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada Afyon Sandıklı jeotermal alanında yer alan kuyuların ve kuyulardan elde edilen sıcak akışkanın fiziksel özellikleri bölgenin jeotermal enerji potansiyelinin ortaya konması amacı ile incelenmiştir. Sandıklı havzasındaki sığ ve derin kuyulardan alınan sıcaklık bilgileri değerlendirildiğinde, Sandıklı ilçe merkezinin batısındaki kuyulardaki sıcaklık değerlerinin çevredeki diğer alanlara göre yüksek olması (ortalama 65 °C) jeotermal kökenli rezervuarın bu bölgede yoğunlaştığını göstermektedir.

## VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING (VES) INVESTIGATION AND PHYSICAL PROPERTIES OF THE WELLS IN AFYON-SANDIKLI GEOTHERMAL AREA

### Keywords

Sandıklı,  
Geothermal,  
Modelling,  
Resistivity.

### Abstract

An electrical resistivity study was carried out to investigate the geothermal potential of an area in Sandıklı, Afyonkarahisar. A total of 6 datasets collected by vertical electrical sounding (VES) technique using Schlumberger electrode array was modelled in one and two dimensions (1D and 2D). A damped least-squares method is used in 1D modelling. In 2D modelling based on smoothness-constrained linearized least-squares optimization, 6 VES points were evaluated on a profile with approximately N-S direction. The geothermal potential of the study area was investigated by determining lateral and vertical directions of the geological formations, groundwater content and low resistivity zones. As the results obtained from the study are taken into consideration, drillings have been proposed in the regions where the resistivity values are less than 15 ohm.m. Physical properties of wells and hot fluids obtained from wells in Sandıklı, Afyon geothermal area were investigated in order to reveal the geothermal energy potential of the region. When the temperature values obtained from shallow and deep wells in Sandıklı basin are evaluated, the temperature values in the wells directed to the west of Sandıklı town center are higher than the other surrounding areas (average 65° C). This situation indicates that geothermal-originated reservoir is concentrated in this region.

\* İlgili yazar / Corresponding author: evrimtutunsatar@isparta.edu.tr, +90-246-281-2300



**Alıntı / Cite**

Dolmaz, M.N., Şahin, B., Tütünsatar, H.E., Balkaya, Ç., (2020). Afyon-Sandıklı Jeotermal Alanında Düşey Elektrik Sondaj (DES) Araştırması ve Kuyuların Fiziksel Özellikleri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 439-450.

**Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)**

M. N. Dolmaz, 0000-0002-9185-9835  
 B. Şahin, 0000-0002-3630-3041  
 H. E. Tütünsatar, 0000-0002-0712-3164  
 Ç. Balkaya, 0000-0002-0191-8564

**Makale Süreci / Article Process**

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	09.01.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	29.03.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	01.04.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

**1. Giriş (Introduction)**

Ülkemizin enerji ihtiyacının sürekli artması, yeni jeotermal alanların araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada araştırma alanı olarak seçtiğimiz Afyon ili Sandıklı ilçesi, çeşitli jeotermal alanlar içermektedir ve sahip olduğu jeolojik yapı gereği bir jeotermal sistemin oluşumu için uygun bir ortam sunmaktadır. İlçede bulunan termal tesisler ve jeotermal yatırımlar bunun göstergesidir.

Mevcut olan bu kaynaklar daha önce gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılmıştır. Afyon il sınırları içerisinde jeotermal alanların belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalarla Ömer-Gecek-Kızık-Uyuz, Gazlıgöl, Heybeli-Çay-Çobanlar ve Sandıklı jeotermal alanları ortaya çıkarılmıştır. Ömer-Gecek-Kızık-Uyuz alanında sıcaklıkları 46-128 °C arasında değişen kaynaklar tespit edilmiş ve bölgede gerçekleştirilen sondaj çalışmaları sonucunda Ömer-Gecek sahasında 49.5-128 °C sıcaklık ve 1600 lt/sn debiye sahip akışkan görünür hale getirilmiş ve 275.25 MWt termal güce sahip jeotermal enerji elde edilmiştir. Gazlıgöl alanındaki sıcaklıkları 38-68 °C arasında değişen kaynaklar, kuyular açıldıktan sonra kurumuştur. Sandıklı bölgesi içerisinde de Koçhisar, Hüdai Hamamı ve Kızılören bölgelerinden geçen KD-GB doğrultulu bir fay bulunmaktadır. Ana fayın etkisiyle fay çevresinde gelişen sentetik faylar da tespit edilmiştir.

Bu çalışmada Afyonkarahisar ili Sandıklı ilçe sınırları içerisindeki bir alanda jeotermal su araştırması amacı ile toplam 6 noktada bir elektrik özdirenç çalışması "Düşey Elektrik Sondaj (DES)" tekniği ve Schlumberger elektrot dizilimi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile alanda bir jeotermal aktiviteyle ilişkili olabilecek düşük özdirenç zonlarının ve jeotermal rezervuarın belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada alanın mevcut durumunun jeolojik-litolojik açılarından incelenmesi ve olası jeotermal sondaj lokasyonlarının belirlenmesi amaçlanarak ilerleyen dönemde yapılacak sondaj ve test çalışmalarına baz alınması öngörülmektedir. Ayrıca bu çalışmada, Afyon-Sandıklı jeotermal alanında yer alan kuyuların ve kuyulardan elde edilen sıcak akışkanın fiziksel özellikleri incelenerek bölgenin genel durumu irdelenmiştir.

**2. Çalışma Alanı ve Çevresi Kaynak Araştırması (Literature Survey for Study Area and Its Surrounding )**

Çalışma alanı ve çevresini kapsayan bölgede jeotektonik ve jeofizik açıdan birçok yerli ve yabancı araştırmacı tarafından pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir.

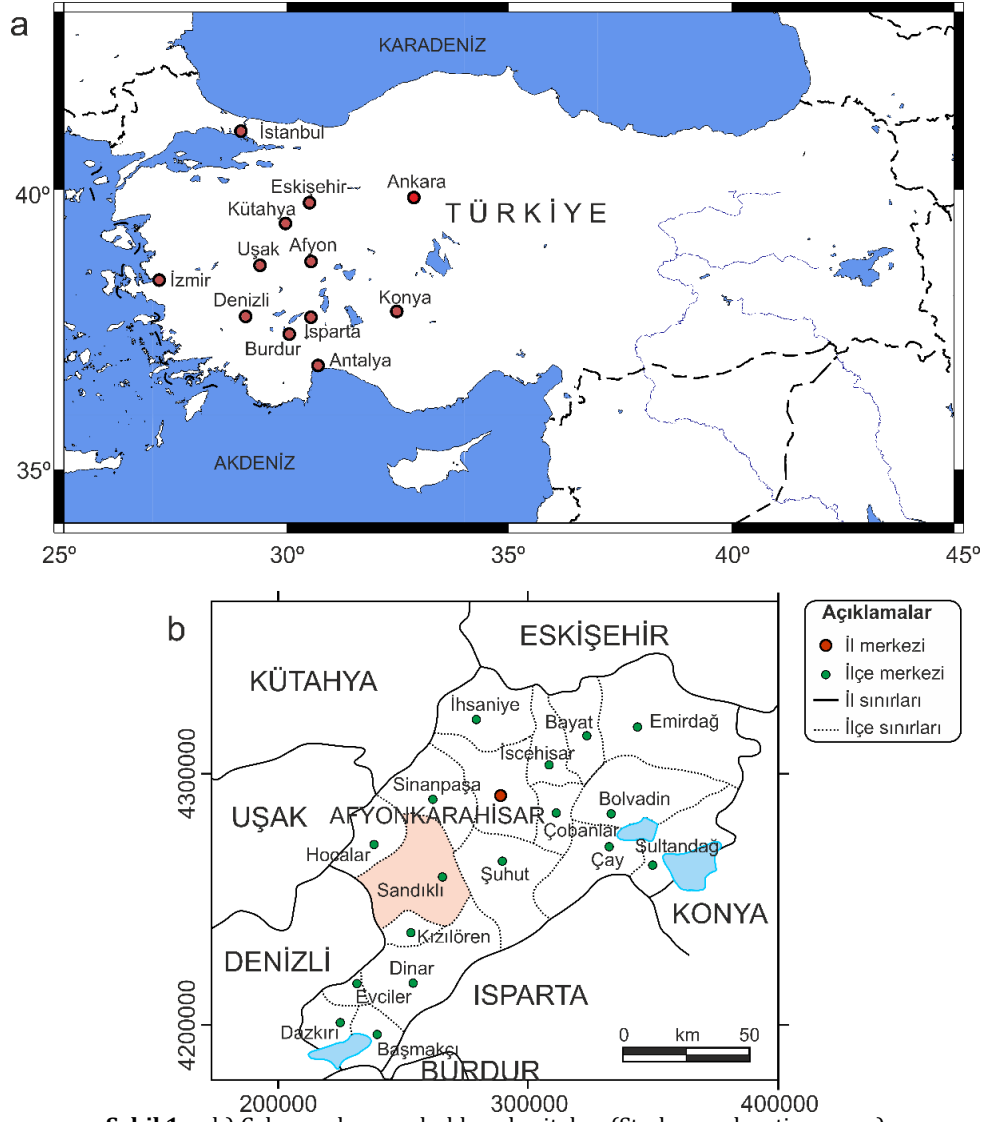
Müller (1955) tarafından yapılan Afyon vilayetindeki termal kaynaklar adlı çalışmasında Hüdai Hamamı yanısıra Gazlıgöl, Ömer, Gecek ve Kızıl Kilise jeotermal kaynakları hakkında bilgiler verilmiştir. Hüdai kaplıcasının bulunduğu alanın tektoniğinden söz edilmiş ve Hamamçayı vadisi boyunca oluşmuş sıcak su kaynaklarının iyi bir kaptaja tabi tutulması gereği vurgulanmıştır.

Ronner (1956) tarafından Hüdai hamamı termal kaynaklarına ve kaplıcalarına dair muvakkat rapor adı altında, bölgenin jeolojisi ve tektoniği, sıcak suların radyoaktivite özellikleri araştırılmıştır.

Ronner (1962) tarafından Sandıklı ovası tektonik ve volkanik açıdan değerlendirilmiştir. Sandıklı ovasının (Orta Anadolu) bir Neojen havzası çöküntüsü olduğu, iki kademededen oluştuğu ve alttaki kademenin Pliyosen-Kuvaterner'den, üstteki kademenin ise Miyosen'den meydana geldiği savunulmuştur. Ayrıca, Kuvaterner boyunca Hüdai hamamı sıcak su kaynaklarının oluştuğunu ve bunların çıkış ısısı ve radyoaktivite tenörü bakımından orta termal ve post volkanik bir safhaya ait olduğu sonucuna varılmıştır.

Şamilgil (1964) tarafından gerçekleştirilen Hüdai Hamamı (Sandıklı) hakkında jeolojik ve hidrojeolojik rapor isimli çalışmasında bölgenin jeolojisi ve tektoniği incelenmiş olup, sıcak suların kökenine dair değerlendirmeler yapılmıştır. Yüksek debide su temini için derin sondajların yapılması gereğini vurgulayan araştırmacı, kaynak civarındaki fayların düşeye yakın bir konuma sahip oldukları ve sondaj lokasyonlarının kaynaklardan çok uzakta olması gerektiği belirtilmiştir.

Öngür (1973) tarafından Sandıklı yerleşim merkezi ve civarının jeolojisi 1/25000 ölçekli olarak çalışılmıştır. Çalışmasında, jeomorfolojik ve tektonik özelliklere ayrıntılı olarak yer verilmiştir. Sonuç olarak da hidrojeolojik ve jeotermal yönden jeofizik çalışmalarının yapılmasının gerekliliği ve önemi vurgulanmıştır.



Şekil 1. a, b) Çalışma alanı yer bulduru haritaları (Study area location maps)

Yenal vd. (1975) tarafından Sandıklı kaplıcası ile ilgili yapılan çalışmada, yörede bulunan sıcak su kaynaklarının kimyasal tahlil sonuçlarına göre; sular alkali, toprak alkali-acı ve bikarbonatlı sular olarak üç gruba ayrılmıştır. Tıbbi açıdan değerlendirmelerin de yer aldığı çalışmada, ileri aşamaya ulaşmayan romatizma vb hastalıkların terapötik tedavilerinde sıcak suların çok yararlı olduğu belirtilmiştir.

Afşin (1991) tarafından Sandıklı Kuruçay ovası ve Hüdai kaplıcasının ayrıntılı olarak hidrojeolojisi incelenmiştir. 450 km<sup>2</sup> lik bir alanda çalışılan inceleme sahasının temelini, Paleozoyik yaşlı epimetamorfiteğin oluşturduğu, bunların üzerine gelen birimlerin Mesozoyik ve Senozoyik boyunca Kuvaternere kadar yer yer kesikli olarak devam ettiği savunulmuştur. İnceleme alanına düşen yıllık ortalama yağış miktarının 474,93 mm, gerçek buharlaşma-terlemenin 380,74 mm olduğu, serbest ve basınçlı akiferlerde yeraltı suyu akım yönünün GD'dan KB'ya doğru olduğu belirlenmiştir. Hüdai kaplıcasında; sıcak ve mineralli su kaynaklarının K-G ve D-B doğrultusunda uzanan fayların birbirini kestiği noktalarda olduğu, sıcaklıklarının 46,5-70 °C, debilerinin ise 87,0-91,5 l/s arasında değiştiği belirlenmiştir.

Afşin ve Canik (1996) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, Sandıklı yerleşim merkezinde yeralan Hüdai kaplıcası detaylı olarak incelenmiştir. Hüdai sıcak ve mineralli su kaynaklarının K-G ve D-B yönünde uzanan fayların kesişme noktalarında açığa çıktığını ve kaynakların sıcaklık, pH, toplam debi ve toplam çözünmüş madde miktarlarının sırasıyla 62°C- 68°C, 6.2-7.5, 87-91.5 l/s ve mineral değerinin 1360-1750 mg/l arasında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca, kimyasal bileşimleri nedeniyle tedavi edici nitelikte olan kaynakların Ca, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub> 'li

radioaktif sıcak ve mineralli sular olduğu ifade edilmiş ve kaynakların farklı jeotermometreler kullanılarak ölçülen hazne kaya sıcaklığının 100 °C-250 °C arasında değiştiği belirtilmiştir.

Ölmez vd. (2000) tarafından Afyon- Sandıklı Hüdai kaplıcası çevresinde yapılan jeofizik çalışmaları sonucu AFS-3 nolu sondaj lokasyonu önerilmiştir.

Hamut ve Şengüler (2001) tarafından hazırlanan Afyon-Sandıklı (Hüdai) jeotermal sahası koruma alanları raporunda 1994 yılında yapılan AFS-1 ve AFS-2 sondaj verileri ile 2000 yılında yapılan AFS-3, AFS-4, AFS-5 ve AFS-6 sondaj verilerini baz alarak koruma alanları belirlenmiştir.

Koçyiğit vd. (2001) tarafından Batı Anadolu horst-graben sisteminin en doğu kesiminde yer alan Sandıklı grabeninin neotektonik özellikleri ve depremselliği incelenmiştir. Sandıklı grabeninin, verev atımlı normal faylarla (Akın, Kemer kayatepe, Ballık fayları) Miyosen sonunda gelişmeye başlamış, Geç Pliyosende başlayan ve Kuvaternerde de devam eden faylanmalarla (Gökçealan, Sandıklı, Maymunkayası ve Hüdaihamamı fayları) bugünkü geometrisini kazandığı ve bölgedeki fayların jeolojik olarak diri olduğu belirtilmiştir.

Özpinar vd. (2002) tarafından Sandıklı civarındaki volkanitlerin yayılımını belirlemek amacıyla öncelikle, 250 km<sup>2</sup> lik alanda 1/25 000 ölçekli jeolojik haritası yapılmış, daha sonra bölgedeki tüflerin teknolojik özelliklerinin saptanmasına yönelik laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Erdoğan vd. (2004) tarafından Sandıklı bölgesindeki temel birimler ayrıntılı olarak incelenmiş ve metamorfik temelde mikaşist, kuvarsit, fillit ve mermerlerin egemen oldukları belirlenmiştir.

Karaman deresi (2004) tarafından Afyon Sandıklı Hüdai Kaplıcası sıcak su sondajlarının (AFS-11, AFS-12, AFS-13 ve AFS-14) lokasyonları belirlenerek gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Karaman deresi (2008) tarafından AFS-14 nolu sondaj lokasyonu belirlenerek sondajın takibi gerçekleştirilmiştir.

Güngör vd. (2004) çalışmalarında, Sandıklı (Afyon) bölgesinde bulunan Erken Kambriyen yaşlı Kocayayla Grubu'nun deformasyon özelliklerini tanımlamışlardır. Kocayayla Grubu 2500 m kalınlığa ulaşan Erken Kambriyen yaşlı bir istif ile temsil edilmektedir. Bu istifin en altında, Erken Kambriyen simgeleyen iz fosilleri içeren fillit arakatlı kuvars kumtaşlarından oluşan Celiloğlu birimi bulunmaktadır. Gögebakan birimi, çört mercekleri, mafik volkanit ve kanal dolgusu çakıltası arakatlıları içeren metapelitler ve metapsammitlerden oluşur ve uyumlu bir dokanak boyunca Celiloğlu biriminin üstünde yer alır. Gögebakan birimi, tortul arakatlılar içeren riyolitlerden oluşan Kestel Çayı volkanitleri ile yan ve düşey yönde geçişlidir. Taşoluk biriminin fillit arakatlıları içeren sarı renkli kumtaşlarından oluşup uyumlu bir dokanak boyunca Kestel Çayı volkanitlerinin üstünde Kocayayla Grubunun en üst birimini oluşturduğunu savunmuştur.

Memiş (2010) tarafından Afyon Sandıklı Hüdai jeotermal alanının hidrojeokimyasal özellikleri belirlenerek iz element kirliliği incelenmiştir. Çalışma alanındaki jeotermal sular Na-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> tipli sular, yeraltı suları ise Ca-HCO<sub>3</sub> tipli sular olarak sınıflandırılmıştır. Jeotermal sulara hakim iyon dizilimi, katyonlar için Na+K>Ca>Mg, anyonlar için SO<sub>4</sub>>HCO<sub>3</sub>>Cl olarak belirlenmiştir. İyon değişim diyagramları, jeotermal suların yeraltında uzun süre kalmadığını göstermektedir. Hüdai jeotermal alanındaki suların rezervuar sıcaklıkları silika jeokimyasal termometreleri ile 85-120 °C arasında hesaplanmıştır. Entalpi-silika ve entalpi-klorür karışım modelleri sırasıyla 108-134 °C ve 98-120 °C rezervuar sıcaklıkları önermektedirler.

Aksever (2011) tarafından yapılan çalışmada yarı kapalı havza özelliğindeki Afyon Sandıklı havzasının jeolojik, hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal özellikleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Sandıklı havzasında en önemli sorunun yoğun tarımsal faaliyetler sonucu aşırı yeraltı suyu çekimi olduğu ve bu nedenle sürdürülebilir kullanım için su potansiyelinin belirlenmesinin büyük önem taşıdığı ifade edilmiştir. Çalışma alanının orta kesimindeki hazne kayacın kuvarsit ve kireçtaşı olan Hüdai sıcak ve mineralli su kaynağının ise Na-SO<sub>4</sub>'lı sular sınıfında olduğu belirtilmiştir. Özellikle Al, Fe, Ba ve Cd elementlerinde kaya-su etkileşimi ve sıcak su akiferi ile etkileşimde olan noktalarda yersel artışlar gözlenmektedir.

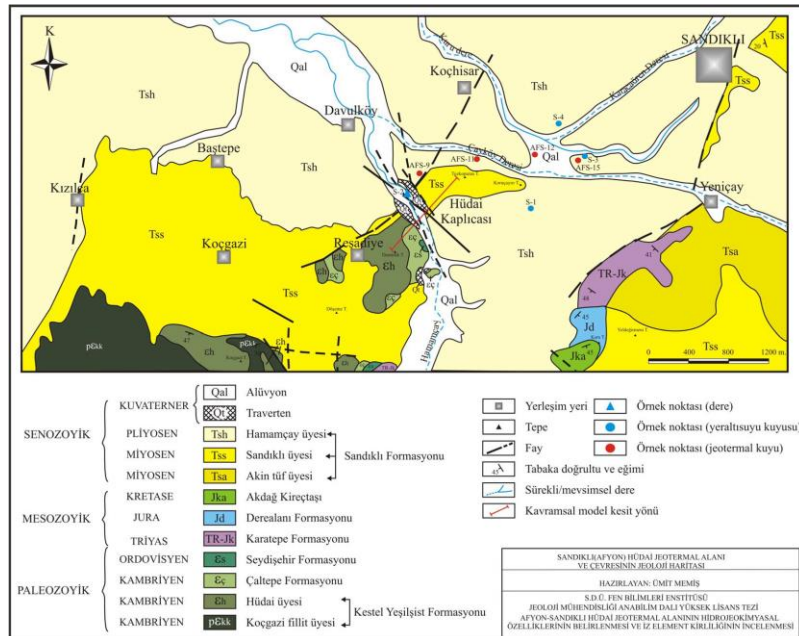
Oğuz (2011) tarafından Sandıklı'da jeotermal alanın temelini oluşturan Paleozoyik yaşlı kayaların sıcak suların ana rezervuarı olduğu ifade edilmiştir. Afyon Paleozoyik grubu olarak tanımlanan birimin metamorfize olmuş kesimi Kestel Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Paleozoyik yaşlı kayaların en üst seviyelerini Hüdai kuvarsit üyesi oluşturmaktadır. Bölgede yapılan arama ve üretim sondajlarından AFS-14 nolu sondaja ait kırıntı örnekleri üzerinde yapılan XRD analiz sonuçlarına göre; dolomit, kuvarsit, feldispat, kil mineralleri, zeolit, klorit, illit ve mika birliktelikleri saptanmıştır. Bu verilerden hareketle, bölgede potasik - albitik alterasyon ve 70 °C-110 °C'lik bir jeotermal ve/veya hidrotermal akışkan etkilerinden söz edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Dolmaz (2014) tarafından İç Batı Anadolu'daki sismik belirtisi olmayan zon ile Sandıklı alanının jeotermal yapısı arasındaki ilişki ile ilgili çalışma yapılmıştır. Yüksek sismik aktiviteli alanlardaki sismik olmayan zonlar ile jeotermal yapı arasında bir ilişki bulunduğu belirtilmiş ve sismik olmayan bu rejyonel zonlarda jeotermal yapılar hakkında arama çalışmalarının yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Dolmaz (2014)'e göre, Sandıklı yerleşimi de sismik olmayan Uşak-Afyon zonunda bulunduğu ve Sandıklı'nın jeotermal yapısının Afrika-Avrasya litosferik plaka sınırlarındaki tektonik hareketler ile ilişkili kontrol edildiği belirtilmiştir. Sismik aktif olmayan bu zonun kuzeyinde Gediz güneyinde ise Dinar son yüzyıl içerisinde büyük depremlere maruz kalmıştır. Sismik aktivite görülmeyen Uşak-Afyon zonunda ise elde edilen sığ Curie derinlikleri, yüksek ısı akısına sahip alanlar, yüksek düşey ısıl gradiyentler, bölgede üst kabuktaki incelmeye ve yüksek kondüktiviteli alt kabuğun sığlaşması büyük bir termal yapıdan kaynaklanmaktadır. Güneyde Dinar ve kuzeyde Gediz gibi iki rejyonel aktif sismik alan arasında kalan ve Sandıklı'yı da içine alan düşük sismik aktivitenin bulunduğu Uşak-Afyon zonu sığ Curie derinlikleri ve yüksek ısı akısı ile özdeşleşmiş olup rejyonel bir jeotermal yapıya sahiptir (Dolmaz vd., 2005; Dolmaz, 2014).

### 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

#### 3.1. Çalışma Alanının Jeolojisi (The Geology of Study Area)

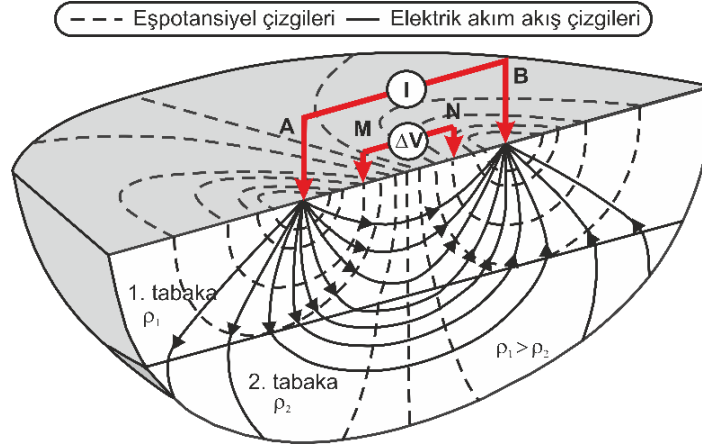
Hüdaî jeotermal alanı, Sandıklı ilçesi sınırları içerisinde Afyon iline 65 km uzaklıkta ve güneybatısında bulunmaktadır (Şekil 1 ve 2). Sandıklı ilçesi ve civarında Hamamçay kaynakları adı altında birçok sıcak su kaynağı bulunmaktadır. Tabanda Koçgazi fillit üyesi çok düşük metamorfizmalı bej, kahvemsi bej renkli ince taneli kumtaşı, siyah ve kahve-mor renkli silttaşı ve bunlarla yer yer arakatlı metabazik sillerinden meydana gelmektedir (Şekil 2). Alt Kambriyen yaşlı Hüdaî Formasyonu çoğunlukla kuvarsitlerden meydana gelmekte ve yer yer şistlerle ardalanmalı olarak bulunmaktadır. Jeotermal sistemin örtü kayacını oluşturan Seydişehir Formasyonu miltaşı, şeyl ve kuvars kumtaşı ardalanmasından oluşmaktadır. İstifin alt düzeylerinde ince, alacalı renkli ve yumrulu kireçtaşı bantları izlenmektedir (Afşin 1991; Özgül vd., 1991; Günay vd., 1995; Gürsu ve Göncüoğlu, 2005). Üst Triyas-Alt Jura yaşlı Karatepe Formasyonu çakıltaşı, kumtaşı ve silttaşlarından oluşur. Derealanı Formasyonu Alt Jura yaşlı olup, marnlı kumtaşı ile başlayıp, üste doğru kumlu, siltli ve killi kireçtaşı, kumlu kireçtaşı ardalanması şeklinde devam etmektedir. Üst Jura-Alt Kretase yaşlı olan Akdağ Formasyonu ise masife yakın breşik kireçtaşları ile başlar, yukarıya doğru çıkıldıkça çört bantları bulunan kireçtaşları ve daha üstte çört oranı artarak dolomitik özellikte kireçtaşları ile devam eder (Afşin, 1991; Özpınar, 2008). Sandıklı Formasyonu, Üst Miyosen yaşlı Akin tüf üyesi, Üst Miyosen yaşlı Sandıklı üyesi ve Pliyosen yaşlı Hamamçayı üyesinden oluşmaktadır. Kuvaterner yaşlı traverten ve alüvyon en genç çökellerdir (Afşin,1991; Özgül vd., 1991; Dean ve Özgül, 1994; Kozlu ve Göncüoğlu, 1995; 1997; Gürsu ve Göncüoğlu, 2005; Özpınar, 2008). Sandıklı jeotermal sahasının ısı kaynağını bölgedeki volkanikler oluştururken, Paleozoik yaşlı metamorfikler içindeki çatlak ve kırıklı şistler ve kuvarsitler rezervuar kayacını meydana getirir (Şekil 2).



Şekil 2. Sandıklı ve çevresinin jeoloji haritası (Memiş, 2010) (The geological map of Sandıklı and its surrounding)

### 3.2. Doğru Akım Özdirenç (DAÖ) Yöntemi (Direct Current Resistivity (DCR) Method)

DAÖ yöntemi, görece maliyetinin düşük olması, kolay uygulanabilmesi ve oldukça verimli sonuçlar üretmesi nedeniyle arama jeofiziğinde özellikle; hidrojeoloji, jeotermal, maden/mineral araştırmalarında ve arkeolojik prospeksiyon çalışmalarında en çok uygulanan yer elektrik yöntemidir. Bu yöntemde, genel olarak yerinin jeolojik yapısı katmanların elektrik iletkenlik özelliklerinden yararlanarak araştırılır. Bu amaç için, yer yüzeyi boyunca gerçekleştirilen görünür özdirenç ölçümleri; iki elektrot yardımıyla yere elektrik akımının uygulanması ve diğer iki elektrot arasında oluşan potansiyel farkının ölçülmesi esasına dayanır (Şekil 3). Görünür özdirenç verileri, sondaj, profil ve sondaj-profil olarak tanımlanan üç farklı ölçü tekniği kullanılarak elde edilir ve toplanan veri kümeleri bir, iki ve üç boyutlu (1B, 2B ve 3B) ters çözüm teknikleriyle değerlendirilebilir.



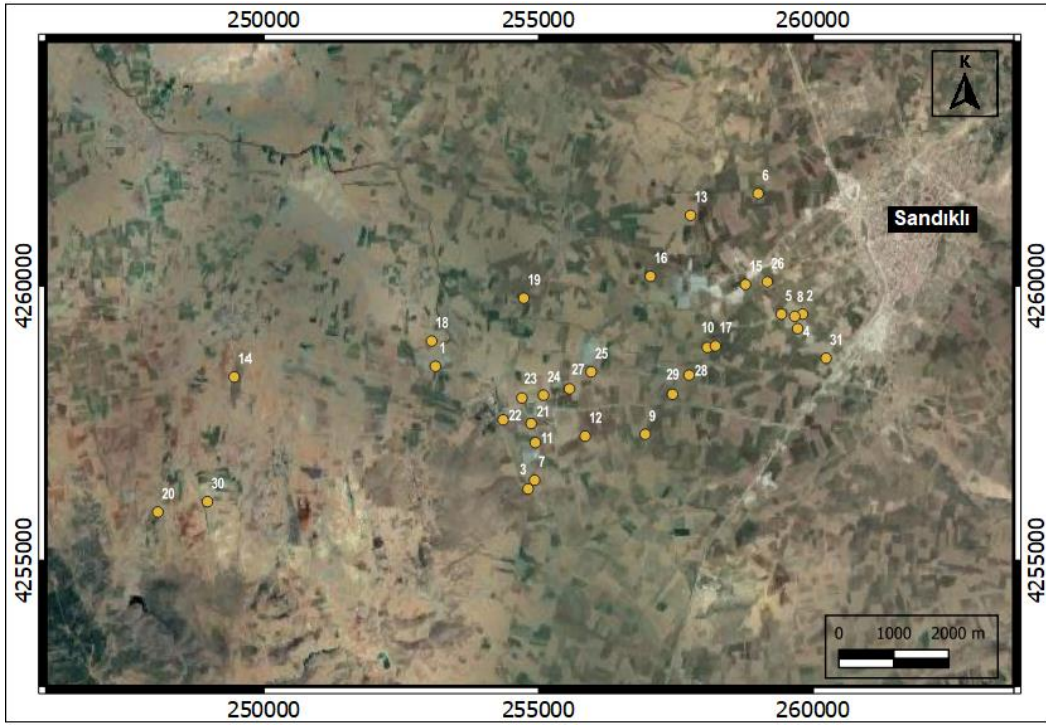
Şekil 3. DAÖ yönteminin temel çalışma prensibi (Seidel ve Lange, 2007'den düzenlenmiştir) (The basic application principle of DCR method)

Bu çalışmada, DAÖ yöntemi, DES tekniği kullanılarak toplam 6 profil üzerinde Schlumberger elektrot dizilimiyle gerçekleştirilmiştir. Görünür özdirenç veri kümeleri, genel olarak, minimum ve maksimum  $AB/2$  değerleri sırasıyla 10 m ve 1200 m olan doğrultular üzerinde toplanmış ve nicel yorum için sönümlü en-küçük kareler yöntemiyle 1B ters çözüm uygulanmıştır. Değerlendirmede, başlangıç modeli olarak her bir DES belirtisindeki ortalama görünür özdirenç değerleri kullanılırken, Jacobian dizeyleri her bir yinelemeye ileri fark yöntemiyle hesaplanmıştır. Dizey terslemeleri için eşlenik türev en-küçük kareler yöntemi (Bjorck, 1996) kullanılmıştır. Ayrıca, yaklaşık K-G doğrultulu bir profil üzerinde bulunan toplam 6 DES noktası düzgünlük-kısıtlı doğrusallaştırılmış en-küçük kareler iyileştirmesine dayanan bir ters çözüm tekniği (Uchida ve Murakami, 1990) ile 2B olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan 2B ters çözüm algoritması, ölçülen ve düz çözümde sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan görünür özdirenç veri kümeleri arasındaki çakışmazlığı en küçükleyerek her bir blokun özdirenç değerini yinelemeli olarak hesaplamaktadır. Algoritmanın jeotermal (Özürkan vd., 2006), arkeolojik prospeksiyon (El-Qady vd., 1999; Candansayar ve Başokur, 2001) ve çevre jeofiziği (Balkaya vd., 2009; Balkaya vd., 2012; Kaya vd., 2015) çalışmalarında başarılı uygulamaları bulunmaktadır.

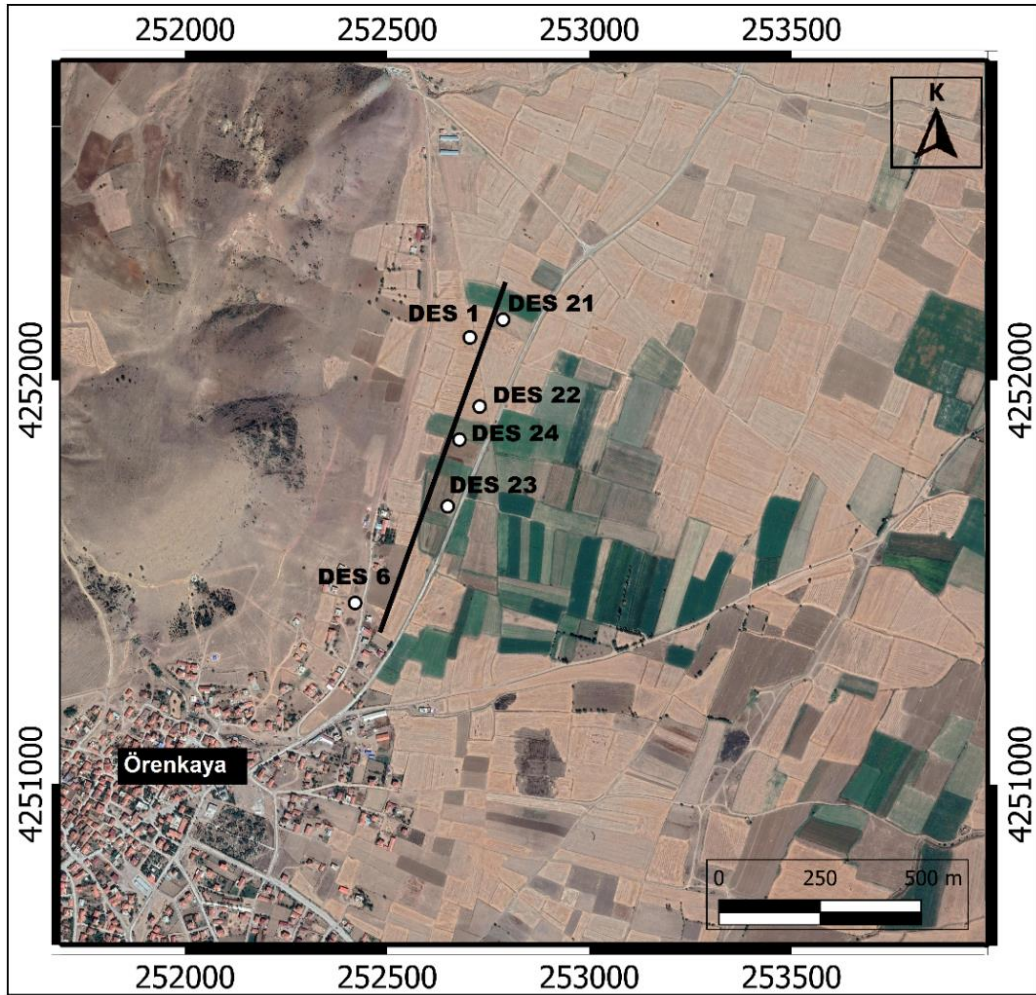
### 4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Arazide yapılan çalışmalardan elde edilen bütün sonuçların değerlendirilmesi, çalışma sahasında jeotermal ortamın olup olmayacağına yönelik olmuştur. Bu kapsamda Afyon Sandıklı bölgesinde yer alan çalışma sahaları içerisinde jeotermal potansiyelin araştırılmasına yönelik aşamalı olarak bölgede daha önce açılmış kuyulardan alınan sıcaklık değerleri değerlendirilmiş ve jeofizik yöntemlerden DAÖ yöntemi uygulanmıştır.

Araştırma sahasında çalışmalar genel olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak açılan kuyuların lokasyonları belirlenmiş (Şekil 4) ve lokasyonları belirlenen birçok kuyudan sıcaklık değerleri alınmıştır. İnceleme alanındaki kuyuların koordinatları ve elde edilen sıcaklık değerleri sınıflandırılmış olarak renk ölçeği ile Tablo 1' de verilmektedir. Sandıklı ilçesi ve civarında bulunan sığ ve derin kuyulardan alınan sıcaklık bilgileri değerlendirildiğinde, çalışma alanı içerisinde sıcaklıkların homojen ve düzenli bir dağılım göstermediğini söyleyebiliriz. Sandıklı ilçe merkezinin batısındaki kuyulardaki sıcaklık değerleri çevredeki diğer alanlardaki kuyulara göre göreceli olarak daha yüksektir ve ortalama 65 °C seviyelerindedir. Buna rağmen yüksek ısıda akışkan bulunduran kuyulara yakın mesafedeki düşük sıcaklık (18-25 °C arası) içeren soğuk su kuyularının olmasında; bu kuyuların derinliklerinin sığ olması, kuyu teçhizat planları (kuyu çapı, boru dizaynı, çakıllama vb.) ve çıkarılan akışkanın kullanım amaçları (tarımsal sulama, hayvancılık vb.) önemli rol oynamaktadır.



Şekil 4. Çalışma alanındaki kuyuların konumları (Kuyu numaraları için Tablo 1'e bakınız) (The location of wells in study area)



Şekil 5. 2B ters çözümde kullanılan DES noktalarının çalışma alanı üzerindeki konumları (The locations of VES points used in 2D inversion)

**Tablo 1.** Şekil 4'te konumları verilen kuyuların sıcaklık durumuna göre sınıflandırılması (The classification of wells given in Figure 4 according to their temperature conditions)

KUYU NO	KUYU ADI	KOORDİNATLARI		SICAKLIK (°C)
		X	Y	
1	Halil Hilmi Kırkpınar kuyusu	4258633	253109	13.3
2	Belediye Terfi merkezi içme suyu	4259587	259798	14.3
3	Çelik Turşu Fabrikası-1	4256396	254797	14.6
4	Sandıklı Tarım kuyusu	4259321	259708	16.4
5	Mehmet Diker kuyusu	4259586	259412	16.4
6	Hidayet Kıymaz kuyusu	4261785	258989	17.8
7	Çelik Turşu Fabrikası-2	4256556	254915	18.2
8	ASS-1	4259546	259656	18.5
9	Sipsim 2 nolu içme kuyusu	4257393	256932	22.3
10	Selçiköyü kuyu güneyi	4258978	258064	24.6
11	Kadioğlu kuyusu	4257241	254930	26.4
12	İrfan Coşkun kuyusu	4257359	255837	26.6
13	Ali Yağcı kuyusu	4261388	257758	27.9
14	Beştepe kuyusu	4258439	249464	28.6
15	Sandıklı Beton kuyusu	4260127	258758	29.1
16	Şaban kuyusu	4260276	257026	36.1
17	Çakıcının kuyusu	4259005	258211	38.8
18	İshak Özbek kuyusu	4259094	253039	46.5
19	İshak Özbek Koç 1	4259877	254719	51.4
20	Aldosan 2 kuyusu	4255974	248074	61
21	Mevlüt Özçınar	4257589	254854	62.7
22	AFS-2	4257656	254342	66.8
23	AFS-9	4258055	254684	69.1
24	Sinanoğlu-1	4258107	255078	69.2
25	Okşanlar kuyusu	4258533	255946	71.5
26	Sanjet kuyusu	4260175	259155	76
27	Yaşarlar kuyusu	4258223	255551	78
28	AFS-11	4258473	257731	80
29	AFS-13	4258123	257428	80
30	Aldosan 1 kuyusu	4256163	248977	80
31	Aktürkler kuyusu	4258782	260227	85

Renk	Sıcaklık
	10°C-20 °C
	20°C-40 °C
	40°C-70 °C
	70°C-90 °C

Sandıklı jeotermal alanında bulunan suların kaynak başında ölçülen bazı kimyasal özellik değerlerine göre, Sandıklı sıcak su kaynakları asidik karakter taşımaktadır (Tamgaç vd., 2008; Oğuz, 2011). Sandıklı jeotermal alanında yer alan kuyu ve kaynaklardan alınan su örneklerinin analiz sonuçlarına göre, beslenmenin alanın doğu, batı ve güney kesiminden alana doğru bu bölgelerden geldiği Tamgaç vd. (2008) tarafından belirtilmiştir.

Sandıklı jeotermal alanındaki bazı kuyulardan elde edilen verilerle oluşturulan sıcaklık dağılımı haritasına göre; mevcut sıcak su kuyularının olduğu bölgeler en yüksek sıcaklıklı alanlardır (Tamgaç vd., 2008). Başlangıçta DSİ'den soğuk su ruhsatı olarak alınan 200-300 m derinliklere sahip ılık su kuyuları civarı bölgelerde suyun sıcaklığı 28-40 °C arasında değişmektedir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen İshak Özbek Koç 1 jeotermal kuyusuna ait statik sıcaklık ve basınç ölçümleri Tablo 2'de verilmiştir. İshak Özbek'e ait Afyon ili Koçhisar köyünde bulunan jeotermal sahasındaki Koç-1 jeotermal kuyusunda alınan kuyu içi ölçümleri Datacan firmasının 1,25"DXB elektronik kuyu içi sıcaklık basınç ölçüm ve kayıt cihazı ile yapılmıştır. Ölçümler yapılırken dakikada 40 metre halat çekebilen elektrikli wireline vinç kullanılmıştır. Yüzeyden itibaren 640 metreye kadar her 20 metrede bir, 640-900 metre arasında ise her 10 metrede bir, 1'er dakika beklenerek statik sıcaklık-basınç profili alınmıştır. Kuyu tabanı 900 metrede ölçülen sıcaklık 51,41 °C dir. Kuyu tabanı basıncı 84,73 bar<sub>g</sub>'dir. Yeryüzünden derine inildikçe jeotermal ısının arttığı ve

kuyu içinde birkaç farklı gradyan gözlenmektedir.

**Tablo 2.** Çalışma alanındaki İshak Özbek Koç 1 kuyusuna ait statik sıcaklık ve basınç ölçümleri (Static temperature and pressure measurements of İshak Özbek Koç 1 well in the study area)

Derinlik (m)	Basınç (bar)	Sıcaklık (°C)	Derinlik (m)	Basınç (bar)	Sıcaklık (°C)	Derinlik (m)	Basınç (bar)	Sıcaklık (°C)
20	0.278168	20.085	398	36.312.928	41.287	716	66.727.077	47.371
40	2.113.654	25.753	417	38.296.061	42.745	726	67.679.987	47.537
60	4.001.597	27.463	437	40.175.781	42.729	736	68.631.455	47.492
80	5.907.887	29.151	457	42.080.225	43.221	746	69.577.683	47.718
99	7.828.236	30.961	477	43.977.361	43.324	755	7.052.452	48.144
119	971.506	32.524	497	45.988.639	43.505	765	71.479.375	48.465
139	11.622.561	33.989	517	47.771.837	43.769	775	72.420.421	48.759
159	13.543.716	35.11	537	49.679.572	44.143	785	73.359.907	48.933
179	15.429.334	35.749	557	51.586.111	44.494	795	74.314.626	49.231
199	17.319.961	36.221	577	53.449.115	45.043	805	75.269.994	49.2
219	19.320.357	36.414	596	55.367.341	45.306	815	76.213.893	49.07
239	2.113.995	36.882	616	57.252.795	45.849	825	77.165.103	49.248
258	23.056.468	37.453	636	59.147.397	45.98	835	78.102.735	49.624
278	24.967.248	37.953	646	60.097.859	46.175	845	7.904.213	49.855
298	26.862.834	38.311	656	61.029.399	46.304	855	79.982.463	50.038
318	28.766.703	38.825	666	619.837	46.227	865	80.936.088	50.221
338	30.675.788	39.503	676	62.939.571	46.243	875	81.884.507	50.347
358	32.575.114	40.032	686	63.898.472	46.41	885	82.850.134	50.671
378	34.484.091	40.55	696	64.847.433	46.842	895	83.802.224	50.892
398	36.312.928	41.287	706	65.783.182	47.182	902	84.732.465	51.41

**Tablo 3.** DES'ler 1, 6, 21-24 için 1B ters çözümden elde edilen katman parametreleri (Layer parameters obtained from 1D inversion for VES' 1, 6, 21-24)

DES No	Katman parametreleri											RMSE
	Özdirenç (ohm.m)						Kalınlık (m)					
1	43.2	21.5	33.3	14.9	31.1	57.9	4.9	10.0	36.3	83.1	110.7	0.90
6	38.4	15.7	8.7	192.5	-	-	17.7	86.7	131.3	-	-	0.68
21	51.1	21.4	11.8	240.1	-	-	17.2	78.6	139.3	-	-	1.03
22	13.4	22.0	13.5	20.5	98.8	-	5.1	15.0	51.0	379.7	-	0.38
23	59.9	14.0	57.7	10.3	54.1	170.2	7.5	9.9	14.7	42.9	408.5	1.08
24	40.1	16.3	23.8	96.7	-	-	9.5	58.8	208.4	-	-	0.39

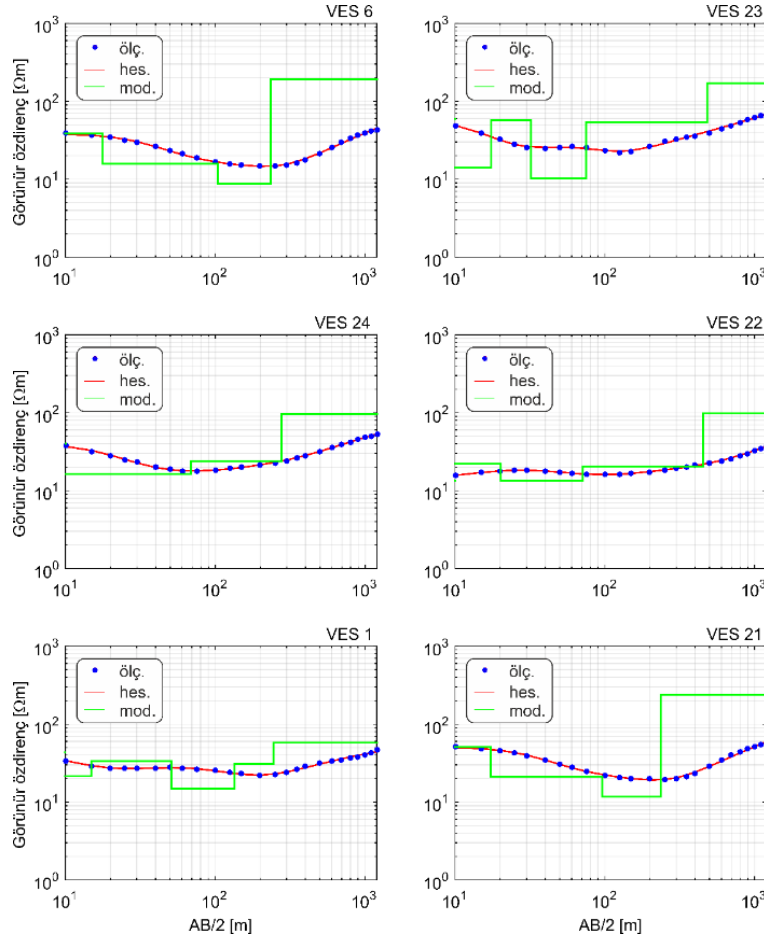
İkinci aşama olarak Sandıklı çalışma sahasında lokal olarak seçilen alanda altı noktada DAÖ yöntemi uygulanmıştır. Bu çalışmalarda düşük özdirenç zonlarının seviyeleri ve varsa altta sıcak su rezervuarı olabilecek kayaların derinlikleri araştırılmıştır. Çalışma yapılan noktalarla ilgili değerlendirmeler; öncelikle kayaların özdirençlerine göre ve sahanın jeolojik, topoğrafik yapıları da dikkate alınarak Schlumberger dizilimiyle bir DES çalışması gerçekleştirilmiştir.

Seçilen noktalarda, yukarıda özetlenen prensibe bağlı kalınarak yüzeyden aşağıya doğru kayaların özdirenç değişimleri gözlenmiştir. DES noktalarında elde edilen bilgiler önce bilgisayar ortamında, daha sonra her ölçü noktasında elde edilen verilerin tek tek değerlendirilmeleri ile çalışma yapılan yerde sıcak kaynağa örtü olma ihtimali olan yerler ve seviyeler ile rezervuar kayaları tespit edilmeye çalışılmıştır. Jeotermal ortamların özdirenç değerlerinin örtü olabilecek üst birimlerde ve daha çok da alttaki formasyonların özdirenç değerlerinden göreceli de olsa düşük değerlerde olması beklenir.

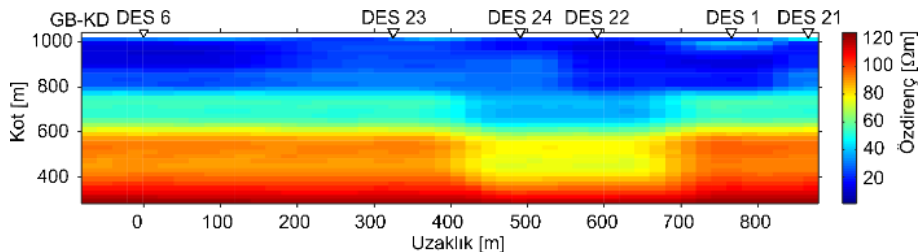
Sandıklı ilçesinin güneyinde yer alan Örenkaya kasabası civarında gerçekleştirilen çalışmada, Schlumberger elektrot dizilimi kullanılarak DES tekniği ile toplanan veri kümeleri 1B ve 2B olarak modellenmiştir (Şekil 4 ve 5). Şekil 6, K-G doğrultulu 6 DES noktasından elde edilen belirtiler ile bunların 1B değerlendirmesiyle hesaplanan belirtilerin bir karşılaştırmasını göstermektedir. 1B ters çözüm ile elde edilen katman parametreleri (özdirenç ve



kalınlıklar) ile ortalama karekök hata (RMSE) değerleri de ayrıca Tablo 3'te sunulmuştur. 1B değerlendirmeden, genel olarak, 4-6 katman arasında ve görece düşük öz direnç değerleri sunan çözümler elde edilmiştir. Şekil 7 ise aynı DES noktalarına ait veri kümelerinin 2B ters çözümünden elde edilen yer elektrik kesitini göstermektedir (RMSE: 0.65). Buna göre, çalışma alanının bu bölümü yaklaşık 200 m derinlik seviyelerine değin yaklaşık 15 ohm.m değerinden küçük öz direnç değerleriyle temsil edilmektedir. 200-400 m derinlik seviyelerindeyse öz direnç 40-60 ohm.m arasında değişmektedir. Bu derinlik seviyesinden sonra ise öz direnç değerleri >80 ohm.m olan bir birim izlenmektedir.



**Şekil 6.** Şekil 5 üzerinde görülen DES noktalarından elde edilen veri kümelerinin 1B ters çözüm tekniği ile değerlendirilmesiyle elde edilen modeller (Models evaluated by 1D inversion technique of data sets obtained from VES points shown in Figure 5)



**Şekil 7.** DES verilerinin 2B ters çözümünden elde edilen yer elektrik kesit (The geoelectrical cross-section obtained from the 2D inversion of VES data)

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Hem kuyulara ait fiziksel parametrelerin değerlendirilmesi hem de jeofizik arama çalışması (DES) yapılmış olan Sandıklı jeotermal sahasının (çalışma alanı), jeotermal saha tanımlamasının temel bileşenleri olan ısıtıcı kayaç, rezervuar kayaç ve örtü kayaç niteliğindeki litolojik grupları ve bunları kesen fay zonlarını bünyesinde barındıran bir saha olduğu kanaatine varılmıştır. Bu temel bileşenlerin varlığı, jeotermal bir potansiyelden söz edilebilmesinin kanıtlarıdır.

Elde edilen tüm sonuçlar tek tek ele alınmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Jeofizik çalışmalar neticesinde toplam 6 adet DES noktası veri kümesini içeren veriler ve sonuçların değerlendirilmesi sahanın jeotermal aktivitesinin fayların kesişme noktasında olabileceğini göstermiştir. K-KB yönlü ve doğuya doğru eğimli Hüdai hamamı fay segmenti ile kesişen ve kesiştiği yerde sıcak su çıkışlarının olduğu fay Örenkaya fayı olarak bilinmektedir. Jeofizik ölçümlerde özellikle P22-P24 ölçüm noktaları civarında elde edilen değerler örtü kayaç olarak kabul edilen Pliyosen-Miyosen birimlerde düşük özdirenç kaparımları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Örenkaya kasabası civarından alınan DES ölçülerinin ters çözüm modellemesi ile oluşturulan kesit 6 noktada gerçekleştirilen bütün ölçülerin bir arada değerlendirilmesini sağlamıştır. Böylece jeolojik formasyonların yanal ve düşey yöndeki uzanımları, yeraltındaki su içeriği ve düşük özdirençli zonlar belirlenerek çalışma alanının jeotermal potansiyeli ortaya konmuştur. Özdirenç dağılımları incelendiğinde; Miyosen birimlerinin özdirenç değerlerinin temel birimlerden daha düşük olması beklenir. Oysa araştırma sahası grabenin ortalarına doğru derinleşmesine rağmen, özdirenç değerlerinin düşmesi sahanın P22-P24 noktalarının yer aldığı kesiminde yoğunlaşmıştır. Bu etkinin faya bağlı aktiveden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmadan elde edilen tüm sonuçlar dikkate alındığında alandaki 15 ohm.m'den düşük özdirenç değerleri gösteren bölgelerde sondajlar önerilmiştir.

Sahada yapılmış olan jeofizik etüt verilerinin mevcut tespitlerle entegre edilerek, entalpi (debi, sıcaklık) beklentisi optimum noktalarda yapılacak sondaj ya da sondajlarda alınacak birincil veriler ışığında netleşebilecektir. Ancak yakın çevredeki sahalar olan Afyon-Ömer ve Gecek sahalarında yakalanmış olan 80-135 °C aralığındaki bir akışkan sıcaklığı, Sandıklı bölgesi için karakteristik sıcaklık beklentisinden uzaktır. Olası debiye ilişkin ise, net bir şey söylemek şu an için pek mümkün görünmemektedir. Sahanın genelinde yapılan gözlemler ve daha önce yapılan çalışmalara ilişkin elde edilen kısıtlı veriler çerçevesinde yüksek entalpi beklentisinin maksimum olacağı zonun derinlerde olduğu düşünülmektedir.

Sandıklı havzasındaki sığ ve derin kuyulardan alınan sıcaklık bilgileri değerlendirildiğinde; Sandıklı ilçe merkezinin batısındaki kuyulardaki sıcaklık değerlerinin çevredeki diğer alanlara göre yüksek olması (ortalama 65 °C) jeotermal kökenli rezervuarın bu bölgede yoğunlaştığını göstermektedir. Sandıklı jeotermal sahasındaki elde edilen bu değerler yapılacak olan 1000 m ve daha derin sondajlarda 50-60 °C arasında akışkan alınma ihtimalini güçlü tutmaktadır. Alandaki termal suların varlığı normalin üzerinde bir ısı akışının göstergesidir. Bu durumda ısıtıcı olarak gittikçe alçalan bir gelişimin son aşamalarında da olsa büyük olasılıkla volkaniklere bağlı bir ısı söz konusudur. Kısacası ısı kaynağı volkanizma sonrası hidrotermal aşamaya bağlı yüksek basınç altındaki emanasyonlardır.

### **Teşekkür (Acknowledgement)**

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından SDÜ-BAP 4453-YL1-15 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Sorumlu Editör ve adı belirtilmemiş hakemlere teşekkür ederiz.

### **Conflict of Interest / Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)**

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

### **Kaynaklar (References)**

- Afşin, M., 1991. Afyon-Sandıklı Kuruçay Ovası ve Hüdai Kaplıcalarının Hidrojeoloji İncelemesi. AÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (yayınlanmamış), 330s.
- Afşin, M., Canik, B., 1996. Hüdai (Sandıklı/Afyon) sıcak ve mineralli su kaynaklarının hidrojeoloji ve hidrokimyasal incelemesi ve kökensel yorumu, Yerbilimleri Dergisi (Geosound), 28, 69-86.
- Aksever, F., 2011. Afyon Sandıklı Havzası Hidrojeoloji İncelemesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 231 s, Isparta.
- Balkaya, Ç., Kaya, M.A., Göktürkler, G., 2009. Delineation of shallow resistivity structure in the city of Burdur, SW Turkey by vertical electrical sounding measurements. Environmental Geology, 57, 571-581.
- Balkaya, Ç., Göktürkler, G., Erhan, Z., Ekinci, Y.L., 2012. Exploration for a cave by magnetic and electrical resistivity surveys: Ayvacık Sinkhole example, Bozdag, Izmir (western Turkey). Geophysics, 77, B135-B146.
- Bjorck, A., 1996. Numerical Methods for Least Squares Problems, SIAM, Philadelphia.
- Candansayar, M.E., Başokur, A.T., 2001. Detecting small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: application to an archaeological survey. Geophysical Prospecting, 49, 13-25.
- Dean, W.T., Özgül, N., 1994. Cambrian rocks and faunas, Hüdai area, Taurus Mountains, southwestern Turkey. Bull. Instit. R. Sci. Naturelle de Belgique-Science de la Terre, 64, 5-20.

- Dolmaz, M.N., 2014. İç Batı Anadolu'daki Sismik Olmayan Zon ile Sandıklı'nın Jeotermal Yapısı Arasındaki İlişki, Markakent Sandıklı Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 254-264, 16-18 Ekim 2014, Sandıklı-Afyonkarahisar.
- Dolmaz, M.N., Ustaömer, T., Hisarlı, Z.M., Orbay, N., 2005. Curie Point Depth variations to infer thermal structure of the crust at the African-Eurasian convergence zone, SW Turkey, *Earth Planets and Space*, 57, 5, 373-383.
- El-Qady, G., Sakamoto, C., Ushijima, K., 1999. 2-D inversion of VES data in Saqqara archaeological area, Egypt. *Earth, Planets and Space*, 51, 1091-1098.
- Erdoğan, B., Uchman, A., Güngör, T., Özgül, N., 2004. Lithostratigraphy of the Lower Cambrian metaclastics and their age based on trace fossils in the Sandıklı region, southwestern Turkey. *Geobios*, 37(3), 346-360.
- Günay, Y., Derman, A. S., Kozlu, H., Göncüoğlu, C. M., Gül M. A., 1995. Stratigraphy of Lower Paleozoic in Southern Turkey. IGCP Project 351 -Early Paleozoic Evolution in NW Gondwana Excursion Guide Book, 3-9.
- Güngör, T., Akay, E., Arslan, A., 2004. Deformation of the Sandıklı porphyroids, TÜBİTAK YDABÇAG Proje No. 102Y064, 1-39, Ankara.
- Gürsu, S., Göncüoğlu, M. C., 2005. Batı Torosların (Sandıklı GB'sı, Afyon) Geç Neoproterozoyik ve Erken Paleozoyik Yaşlı Birimlerinin Jeolojisi ve Petrografisi. *MTA Dergisi*, 130, 29-55.
- Hamut, M.N., Şengüler, L., 2001. Afyon-Sandıklı (Hüdaı) jeotermal sahası koruma alanları raporu. MTA Rap., No. 10458, Ankara.
- Karamandere, İ.H., 2004. Sandıklı (Afyon) SANJET A.Ş. Sıcak su arama etüt raporu. JEM-2004-1. (SANJET A.Ş.).
- Karamandere, İ.H., 2008. Sandıklı(Afyonkarahisar) SANJET A.Ş. AFS-14 nolu sondaj ve kuyu jeolojisi bitirme raporu 8.
- Kaya, M.A., Özürlan, G., Balkaya, Ç., 2015. Geoelectrical investigation of seawater intrusion in the coastal urban area of Çanakkale, NW Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 73, 1151-1160.
- Koçyiğit, A., Cihan, M., Özacar, A., 2001. Dombayova ve Sandıklı (Afyon) grabenlerinin depremselliği ve kenar faylarının, kinematik analizi, TÜBİTAK YDABÇAG Proje No. 199Y007, 1-57, Ankara.
- Kozlu, H., Göncüoğlu, M.C., 1995. Infracambrian units in Sandıklı area. (eds: Göncüoğlu M.C. and Derman A.S.) Guide Book to Early Palaeozoic in NW Gondwana. Turkish Association Petroleum Geologists, Special Publication, 2, 11-13.
- Kozlu, H., Göncüoğlu, M.C., 1997. Stratigraphy of the Infracambrian Rock-Units in the Western Taurides and Their Correlation with Similar Units in Southern Turkey. (eds: Göncüoğlu M.C. and Derman A.S.) Early Palaeozoic in NW Gondwana. Turkish Association Petroleum Geologists Special Publication, 3,50-61.
- Memiş, Ü., 2010. Afyon-Sandıklı Hüdaı Jeotermal Alanının hidrojeokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi ve İz Element Kirliliğinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74 s., Isparta.
- Müller, G., 1955. Heybeli (Kızılkilise) Kaplıcasının Hidrojeolojisi., 20, Ankara.
- Oğuz, A., 2011. Sandıklı (Afyonkarahisar) Jeotermal Alanının Hidrotermal Alterasyon Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 73s.
- Ölmez, E., Karlı, R., Hamut, M.N., Karzaoğlu, H., 2000. Afyon-Sandıklı (Hüdaı Kaplıcası) jeotermal alanı jeolojik etüt raporu. MTA Rap., No.10419, Ankara.
- Öngür, T., 1973. Sandıklı (Afyon) Jeotermal Araştırma Bölgesine İlişkin Jeolojik Durum ve Jeotermal Enerji Olanakları. MTA Rapor No: 5520, Ankara (yayımlanmamış).
- Özgül, N., Bölükbaşı, S., Alkan, H., Öztaş, Y., 1991. Göller bölgesi ve Ispartanın Jeolojisi ve Stratigrafisi. TPAO arama grubu rapor no: 3028, 321 s., Ankara (yayımlanmamış).
- Özpinar, Y., Çobanoğlu, İ., Bozkurt, R., 2002. Sandıklı zeolitik tüflerin petrografik petrokimyasal ve teknolojik özelliklerin incelenmesi, TÜBİTAK YDABÇAG Proje No. 198Y102, 1-268, Ankara.
- Özpinar, Y., 2008. Sandıklı (Afyon) Yöresinde Şabazit ve Fillipsit Mineralleri İçeren Tüflerin Minerolojik Petrografik ve İyon Değişirme Özellikleri ve Tarımda Kullanılması, GB Anadolu, Türkiye. MTA Dergisi, 137, 27-47.
- Özürlan, G., Candansayar, M.E., Şahin, M.H., 2006. Deep resistivity structure of the Dikili-Bergama region, west Anatolia, revealed by two-dimensional inversion of vertical electrical sounding data. *Geophysical Prospecting*, 54, 187-197.
- Ronner, F., 1956. Hüdaı Hamamı termal kaynaklarına ve kaplıcalarına (Sandıklı- Afyon) dair muvakkat kısa rapor. M. T. A. Rap. No. 2493, Ankara.
- Ronner, F., 1962. Sandıklı ovası çöküntüsü -Genç tektonik ve volkanik durumlar, MTA Dergisi, 59, 69-89, Ankara.
- Seidel, K., Lange, G., 2007. Direct current resistivity methods. *Environmental Geology - Handbook of Field Methods and Case Studies*, pp. 205-237.
- Şamilgil, E. 1964. Hüdaı Hamamı (Sandıklı) hakkında jeolojik ve hidrojeolojik rapor. MTA Rap. No:3598, Ankara.
- Tamgaç, Ö.F., Akan, B., Peker, B., Ünal, H., 2008. Sandıklı (Afyon) Jeotermal Alanının Koruma Alanları Etüt Raporu, MTA Rap. No. 2006-33-46, Ankara.
- Uchida, T., Murakami, Y., 1990. Development of a Fortran Code for the Two-Dimensional Schlumberger Inversion. *Geological Survey of Japan Open-File Report*, No. 150, p 50.
- Yenal, O., Osman, N., Kanan, E., 1975. Türkiye Maden Suları Ege Bölgesi, İstanbul Üniversitesi Tıp Fakültesi, Hidroklimatoloji Kürsüsü, İstanbul, 3, 335 s.



## KARAYOLLARINDA ÜSTYAPI TİPİNİN KARBON AYAK İZİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Emre ALTINÖZ\*, Serdal TERZİ

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler Öz

*Karbon Ayak İzi,  
Karbon dioksit,  
Birincil Ayak İzi,  
Asfalt Yol,  
Beton Yol.*

Çalışmada daha yaşanılabilir bir dünyaya katkı sağlamak üzere etkisi büyük olan ulaşım etkeni içerisinde esnek ve rijit üstyapıların karbon ayak izi takibi yapılmıştır. Esnek ve rijit yol uygulamalarının tüm yaşam döngüsü süresindeki çevresel etki ISO 10440 ve ISO 14044 standart metotları ile karbon ayak izi takibi yapılmıştır. IPCC Metodolojisi kullanılarak teorik hesaplamalar yapılmıştır. Avrupa Bitüm Birliği, ASMÜD (Asfalt müteahhitleri Birliği Derneği) ve Avrupa Beton Birliği Ölçüm Kombinasyonları yöntemine göre birincil ve ikincil karbon ayak izi takibi yapılarak esnek ve rijit üstyapıların karşılaştırılması incelenmiştir. Asfalt ve rijit yol yapımı süresince harcanan ve geri kazanım CO<sub>2</sub> şeması ve tabloları düzenlenmiştir. Sonuçlar Highways Agency Karbon hesaplama aracı tablosu halinde listelenmiştir. Yapılan karşılaştırmada asfalt yolların yapımı ve 1'inci yılsonunda çimento betonu yola oranla daha az karbon salınımı olduğu tespit edilmiştir. Ancak %2,35'lik yakıt tasarrufundan kaynaklı beton yolda asfalt yola oranla her yıl 5,8 ton CO<sub>2</sub> daha az salınım meydana gelmiştir. Elde edilen ölçümler ve araştırmalar ışığında, karbon salınımı ve karbon alınımı (geri kazanım) dikkate alındığında çıkardığımız teorik sonucu da uygun olarak %2,35'lik yakıt tasarrufu, karbondioksit (CO<sub>2</sub>) azalması beton yolu daha sürdürülebilir yol olduğunu göstermiştir.

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CARBON FOOTPRINT ON THE PAVEMENT TYPE OF HIGHWAY

### Keywords

*Carbon Footprint,  
Carbon Dioxide,  
Primary Footprint,  
Paved Roads,  
Concrete Roads.*

### Abstract

In this study, the carbon footprint of flexible and rigid pavements has been monitored to contribute to a liveable world. The environmental impact of flexible and rigid road pavements' carbon footprint throughout the entire life cycle has been monitored in accordance with the standard methods ISO 10440 and ISO 14044. Afterwards, theoretical calculations have been made using IPCC method. The primary and secondary carbon footprints for flexible and rigid pavements have been obtained using European Bitumen Association, European Union Asphalt Contractors Association and European Concrete Union Measurement Combinations methods and compared each other. Produced CO<sub>2</sub> by construction phase and recovered CO<sub>2</sub> afterwards, of the flexible and rigid pavements, have been listed in tables and the results are demonstrated in the Highways Agency Carbon calculation tool. As a result, flexible roads have less carbon footprint at the end of the first year after the construction. However, because of the fuel saving ratio of 2.35%, less than 5,8 tons of CO<sub>2</sub> has been released each year compared to the flexible pavements. Consequently, when both, carbon emission and recovery, and 2.35% fuel saving rate are taken into consideration, the rigid pavement is a better and sustainable choice.

### Alıntı / Cite

Altınöz, E., Terzi, S., (2020). Karayollarında Üstyapı Tipinin Karbon Ayak İzi Etkisinin Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 451-459.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Altınöz, 0000-0003-1007-7426  
S. Terzi, 0000-0002-4776-824X

### Makale Süreci / Article Process

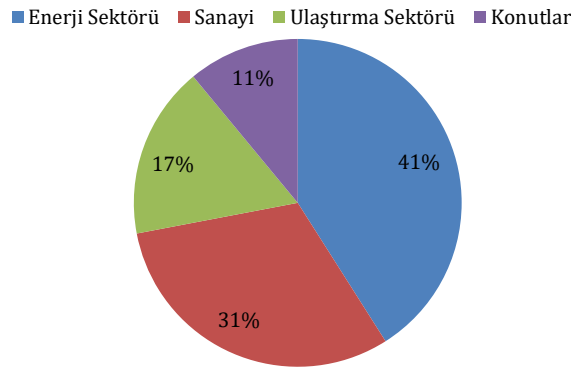
<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	31.05.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	09.06.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	13.06.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: emre-altinoz@outlook.com , +90-246-211-1226

## 1. Giriş (Introduction)

İklim sistemi, dünya üzerinde yaklaşık olarak 4.5 milyar yıllık jeolojik tarihi süresince, milyonlarca yıldan on yıllara kadar tüm zaman diliminde değişme eğilimi içerisinde girmiştir. Küresel sıcaklıkların ortalama sıcaklıklar içerisinde olan 10.000 yıldaki herhangi bir yüzyılda 10°C'den daha fazla değişmesi olasılığı görülmeyeceği düşünülmektedir. Kısa adı NASA olan Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi, 1800'den günümüze kadar en sıcak yılın 2005 olup, onu 1998'in izlediğini belirtmiştir (Pekin, 2006).

Bu yıllarda küresel sıcaklıkların artmasında önemli etken olan dünyadaki sera gazlarının artması ile birlikte doğru orantılı olduğu belirtilmiştir. Sera gazlarının artması ile birlikte küresel sıcaklıklarda yükselişe sebep olduğu gibi iklim sisteminde de değiştirmiştir (Alexander vd., 2009). Haines vd. (2006), Özellikle ulaştırma sektöründeki fosil yakıtların yanmasından ortaya çıkan, küresel ısınmaya etki eden sera gazları içerisinde önemi büyük olan, karbondioksit (CO<sub>2</sub>) küresel ısınmaya yaklaşık %60 oranında etkilemektedir. CO<sub>2</sub>'nin atmosferdeki kalma süresi 6 yıldır. Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) 2005'deki sıcaklıkların 1998'den daha yüksek olduğunu doğru kabul ederek, bu dönemde sadece atmosferdeki sera gazı olan CO<sub>2</sub> birikimi yaklaşık 280±10 ppm dolaylarında değişen bir dalgalanma gösterdiğini bildirmiştir (Pekin, 2006). Türkiye'de küresel ısınmadaki etkenler sırasıyla enerji sektörü %41, sanayi %31, ulaştırma %17 ve konutlar %11 olarak belirtilmiş ve Şekil 1'de gösterilmiştir (Diler,2006).



**Şekil 1.** Türkiye'de Karbondioksit Emisyonlarının Sektörlere Göre Dağılımı (Diler, 2006) (CO<sub>2</sub> emission distribution based on sectors in Turkey (Diler, 2006))

Bu çalışmada amaç, küresel ısınmaya Türkiye'de %17 oranında etkisi olan ulaştırma sektöründen (Diler, 2006) kaynaklanan karbondioksit salınımlarının azaltılması ve yaşanılabilir bir dünyaya katkı sağlamak üzere ulaştırma etkeni içerisinde esnek ve rijit üstyapı tiplerinin karbon ayak izine etkisinin araştırılmasıdır. IPCC hesaplamaları ve ölçüm sonuçlarının İngiltere karbon ayak izi hesaplama Anonim (2009), tablosuna işlenmesi ile esnek ve rijit üstyapı karbon ayak izi karşılaştırılması yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Bu çalışmada hem rijit üstyapılar hem de esnek üstyapılar incelenmiştir. Bu nedenle de bu bölümde her iki üstyapı tipi kısaca anlatılmıştır.

TUİK (2015; 2018), Rijit üstyapı için yüksek eğilme mukavemeti ile portland çimentosu kullanılarak yapılan tek tabakalı bir plak yardımıyla yükleri dağıtan bir üstyapı tipi tanımı yapılır. Rijit üstyapı tabakasında kullanılan çimento üretimindeki karbondioksit emisyon miktarları belirlenmesinde kabul edilen ve sektör içerisinde faaliyet gösteren, sürdürülebilirlik raporunu yayınlayan Akçansa ve Çimsa'nın verileri ışığında çalışma yapılmıştır. Bu firmalar üç farklı ürün için EPD raporu da yayınlamıştır. Yayınlanan raporda 2013 yılı içerisinde Türkiye'de yaklaşık olarak 74 milyon ton çimento üretildiği belirtilmiştir. Akçansa tarafından sürdürülebilirlik raporunda 2013 yılını kapsayan dönemde bir ton çimento üretiminden kaynaklı 753 kg CO<sub>2</sub> emisyonu olduğu ifade edilmiştir (Akçansa, 2014). Çimsa tarafından açıklanan raporda 732 kg CO<sub>2</sub> emisyonu açıklaması yapılmıştır (Çimsa, 2013). Bu değerler farklı çimento sınıflarından kaynaklanan emisyon değerlerinin ağırlıklı ortalamasıdır. Bu firmaların atık ısıdan geri kazanım, alternatif yakıt ve hammadde kullanımı ve enerji verimliliği gibi konularda öncü olduğu düşünülürse verilerin Türkiye ortalamasının üstünde olmayacağı öngörülebilir. Ürünler incelendiğinde Türkiye geneli ile paralel olduğu görülmektedir. Sonuçta 2013 yılında bir ton çimento üretiminden kaynaklı CO<sub>2</sub> eşdeğeri ortalama 742 kg olarak belirlenebilir. 74 milyon ton çimento düşünülüğünde, 55 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyonu olduğu söylenebilir. Çalışmada üretilen klinker kütlesi ton cinsinden ve klinker için emisyon faktörleri verileri girilerek CO<sub>2</sub> emisyonu ton bazında hesaplanmıştır. Çimento için ise CO<sub>2</sub> emisyonu ise yıllık tüketilen çimento üretimi ton cinsinden verisi, çimentoda klinker fraksiyonu verileri girilerek üretilen çimento türünden klinker kütlesi (ton)

cinsinden hesaplanmıştır. Debroux vd. (2007), Kanada'da Ulusal Araştırma Konseyi tarafından yapılan araştırmada kaplama çeşidinin ağır yük taşıtlarının yakıt tüketimindeki etkisi incelenmiştir. İncelenen konu içerisinde fosil yakıt tüketimini azaltmanın sosyal ve çevreyle ilgili önemi dolayısı ile yol kaplamalarının araçların ve ağır yük taşıtlarının yakıt tüketimindeki etkileri konusunda da incelemeler yapılmıştır. Yakıt tüketimi konu olduğunda yapılan karşılaştırmalarda rijit yolun esnek yola oranla daha az karbon salınımı meydana getirdiği belirlenmiştir. Genel olan çalışmada farklı düzgünlük seviyeleri olan kaplama tabakaları ve her mevsimde yapılan gözlemleri kapsayan son aşama en düşük farklılıkları çalışma sonunda gösterdi. Yakıt tasarrufu olarak ortalama % 2.35 yakıt tasarrufu göz ardı edilmesi mümkün olmayacağı ve hesaplamalarda büyük farklılıklara neden olur.

Karbondioksit emisyonlarının düşürülmesine, endüstriyel atıkların geri kazanımı için çimento fırınlarında kullanılan taşıt lastiği, solvent, atık yağ, atık su arıtma çamuru, boya artığı gibi malzemelerin alternatif yakıt olarak kullanılması önemli oranda katkı sağlar. Geri dönüşümde kullanılan bu malzemeler çimento üretimi sırasında yakılmadıklarında normal yollarla yakılmak durumundadır. Burada enerji kazanımı çok azdır ve karbondioksit emisyonları çimento endüstrisinde oluşan salınımlarla beraber hesaplanmak zorunda kalır. Geri dönüşümde kullanılan bu tür atıklar çimento fırınlarının 1450°C ulaşan sıcaklıklarda yakıldıklarında içlerindeki tüm organik moleküller yok edilir ve çevre için herhangi bir tehlike yaratmaz. Geri dönüşüm maddelerinden geriye de hiçbir şey kalmamaktadır (EUPAVE, 2009).

Kjellsen vd. (2005), Çimento üretimi sırasında dekarbonizasyon sürecinin sonucu CO<sub>2</sub> salınımı olur. Rekarbonizasyonun (tekrar karbonlaşmanın) sonrasında da CO<sub>2</sub> yaşam süresince beton tarafından emilir. Moloz betonlar 2 - 3 yıllık bir sürede havadan 15-35 kg / m<sup>3</sup> 'lük bir miktar karbondioksit emilimi yaparlar. Yaşam dönemine bakarsak o zaman yol betonu için toplam CO<sub>2</sub> alınımı olarak 25-45 kg/ m<sup>3</sup> gibi rakama ulaşır. Beton yapımında kullanılan 350 kg/m<sup>3</sup> yüksek fırın çimentosunun üretimi sırasında salınan CO<sub>2</sub> miktarının %15'i tekamül etmektedir (EUPAVE, 2009).

Esnek üstyapı tabakası yapılırken bitümlü sıcak karışım için; agregalar 160°C-170°C'ye ısıtılır. Agregalar diğer adımda 150°C-160°C'ye ısıtılmış bitüm ile karıştırılır ve kurutucu tarafından çıkan alevler ile kurutulma işlemi yapılır. Diğer yandan da bitüm, yalıtılmış, elektrikli veya kızgın yağ ısıtmalı tanklar içinde ısıtılarak mikserin içerisinde karıştırılır (ASMÜD, 2018).

Asfalt plentler genel olarak atmosferik emisyonu neden olurlar. Kurutma ve karıştırma aşamalarında açığa çıkan gazlar belirlenmiştir. Salınım tablolarına göre düzenlenmiş ve limit değerler ile son şeklini almıştır. Asfalt üretimi esnasında salınan gazların olması kaçınılmazdır. Asfalt yüklenmesi ve boşaltılması esnasında sızan emisyonlar için önlem alınıp bu sızmaların azaltılması yapılabilmektedir. Esnek üstyapı tabakası tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlar. Yükleri taban zeminine dağıtan bir üstyapı tipidir. Bağlayıcısız alttemel, temel malzemeleri üzerinde trafiğe bağlı olarak bitümlü sıcak karışımla yapılmış tabakalardan veya bitümlü sathi kaplamadan oluşmaktadır. Asfalt plentlerinde 160°C civarında ısıtılmış mineral agrega ile bitümün karıştırılmasıyla sıcak karışım asfalt olarak da adlandırılan bitümlü sıcak karışım meydana gelmektedir. Karışım gradasyonu içerisinde agrega %93-97 oranında kullanılırken bitüm %3 ila %7 arasında yer almaktadır. Bitüm ham petrolün rafinerilerde uygun metotlarla damıtılması sonucu elde edilen bağlayıcı bir malzemedir. Yol yapım ve bakımında kullanılan bitümlere asfalt çimentosu adı da verilmektedir. Agregaya belirli bir gradasyona ve kaliteye sahip kayaç parçaları, çakıl, kırmataş, kum ve benzeri mineral malzeme veya bunların karışımından meydana gelmektedir.

IPCC (2006), Bu çalışmada yol üstyapısının aynı uzunluk ve kalınlıkta esnek ve rijit üstyapı tabakalarının kaynaklanan sera gazlarının IPCC metodolojisi kullanılarak emisyonları hesaplanmıştır. Burada rijit üstyapı ve esnek üstyapı tabakasının malzeme temini, inşaat aşaması, rutin bakım ve ömür döngüsü hesaplamaları yapılmıştır. IPCC; 1988 yılında WMO ve UNEP' in oluşturduğu uluslararası bir kurumdur. IPCC dünyadaki küresel iklim değişiklikleri, iklim değişikliğinin çevreye olumsuz sonuçlarını ve bunların en aza indirgenmesi için politikalar uygulamaktadır. IPCC programı ile "Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri Raporu'ndaki" emisyon faktörleri ve belirsizlikler kullanılarak sera gazı emisyonları programdaki tier 1, tier 2 ve tier 3 yaklaşımlarına göre hesaplanmaktadır. Sera gazı emisyonu; faaliyet verilerinin faktörler ile çarpılmasıyla elde edilir. Ölçme birimi olarak ton kullanılır ve her bir sera gazı uygun GWP' ler kullanılarak CO<sub>2</sub> eşdeğer tona çevrilir.

Esnek ve rijit yol uygulamalarının yapımında ve kullanımında tüm yaşam döngüsü süresindeki çevresel etki (ISO 10440, ISO 14044) standart metotları ile karbon ayak izi takibi yapılmıştır. IPCC Metodolojisi kullanılarak teorik hesaplamalar yapılmıştır. Avrupa Bitüm Birliği, ASMÜD (Asfalt Mütahitleri Birliği Derneği) ve Avrupa Beton Birliği Ölçüm Kombinasyonları yöntemine göre İngiltere karbon ayak izi hesaplama tablosundan faydalanılarak, malzeme temini aşaması, inşaat aşaması ve rutin bakım ve ömür sürelerinin karbon ayak izi takibi yapılarak esnek ve rijit üstyapıların karşılaştırılması incelenmiştir.

Esnek ve rijit üstyapı tabakalarının malzeme temini aşamasında kullanılan formüller belirlenmiştir. Kaplama tabakaları 1 km uzunluğunda tek şeritli 4 m genişliğinde ve 0,15 m kalınlığında düşünülmüştür. Esnek ve rijit üstyapı tabakası yapımında gerek duyulan inşa malzemelerinden kaynaklanan karbondioksit salınımı Denklem 3.1 ile hesaplanmaktadır. Esnek üstyapı için malzeme özgül ağırlığı 2,4 ton/m<sup>3</sup>, rijit üstyapıda çimento miktarı için 350 kg/m<sup>3</sup> alınmıştır.

$$\varepsilon_{CO_2} = l * b * h * \gamma * S_{CO_2} \quad (1)$$

Burada;  $\varepsilon_{CO_2}$ , karbondioksit emisyonunu (kg/ton),  $l$  yolun uzunluğunu (m),  $b$  yolun genişliğini (m),  $h$  yolun derinliğini (m),  $\gamma$  yol inşa malzemelerinin özgül ağırlığını ( $t/m^3$ ) ve  $S_{CO_2}$  birim karbondioksit salınımını (kg/ton) ifade etmektedir.

Esnek ve rijit üstyapı tabakalarının inşaat yapım aşamasında kullanılan formüller belirlenmiştir. Esnek ve rijit üstyapı tabakası yapımında ısıtma, kurutma ve karıştırma süresinde CO<sub>2</sub> emisyonu Denklem 1 ile hesaplanmıştır. İnşaat aşamasında kamyonlara yüklenmesi, kamyonlar ile taşınması esnasında yakıt tüketimi ve serim amacıyla kullanılan finisher yakıt tüketimi, silindir yakıt tüketimi her iki yol üstyapı tabakası için benzer uygulamalar olup sonucu çok etkilemediğinden dikkate alınmamıştır.

Esnek ve rijit üstyapı tabakalarının rutin bakım ve ömür döngüsü süresinde kullanılan formüller belirlenmiştir. Esnek ve rijit üstyapı tabakası yapıldıktan sonra CO<sub>2</sub> geri kazanımı Denklem 1 ile hesaplanabilmektedir. Yolun ömür süresinde üstyapı tabakasını kullanan araçların yakıtlarından kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonu IPCC Tier 1 formülü (Denklem 1) ile hesaplanmıştır. Üstyapı tabakalarını kullanan araç sayısı 1000 olarak düşünülmüş ve yakıt türü olarak benzin dikkate alınmıştır.

Örnek olarak 2016 yılı verileri ile karayolunda 2156263 ton benzin tüketilmesi sonucunda açığa çıkan karbon emisyonu hesaplaması gösterilmiş ve bu hesaplama referans alınarak çalışmalar yapılmıştır (KGM, 2016)

Bu şekilde yapılan hesap ile 2016 yılında, karayollarında tüketilen 2156263 ton benzin, 6627,46 Gg CO<sub>2</sub> emisyonu vermektedir. Bu da 6,6 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyonuna eşittir.

### 3. Bulgular (Research Findings)

Karaçor vd. (2010), Esnek üstyapı tabakaları birincil ayak izi yani doğrudan karbon salınımı yönünden beton yol tabakalarına göre daha avantajlıdır. Ancak, beton kaplamalar enerji, su, doğal kaynaklar, radyoaktif atıklar ve koku yönlerinden asfalt kaplamadan ikincil ayak izi yani dolaylı karbon salınımları yönünden daha avantajlı hale gelmektedir. Ancak, yol yapımında kullanılan hammadde hazırlanması, yol yapımı, servis ömrü, rutin bakım ve ömür döngüsünde incelendiğinde en önemlisi ulaştırma için kullanılan yakıtların hesaba katılması tamamen farklı bir tablo karşılacaktır. Ulaştırma sektöründe kullanılan araçların yakıt tüketimini düşürmek önem taşımaktadır. Bu yüzden farklı yol üstyapı kaplama tipleri yaşam dönemi değerlendirilmesine bakılarak yapılan karşılaştırmalarının çeşitli çevresel göstergeler için daha az "siyah-beyaz" bir resimle sonuçlanacağı düşünülebilir. Yapılan çalışma sonucu ne olursa olsun, geliştirme, yapım, bakım teknikleri, yıkım ve geri kazanım alanlarında çalışmalar devam ettikçe sonuç daha objektif olacaktır. Yapılan çalışmalar bize göstermiştir ki en önemli faktör yakıt tüketimi faktörüdür. Karbon ayak izi takibi için malzeme temini, inşaat aşaması, rutin bakım ve ömür döngüsü süresinde karbon emisyon takibi yapılmıştır. Esnek üstyapı tabakası ve rijit üstyapı tabakası için aynı km ve ortamlarda yapılması düşünüldüğü üstyapı kaplaması karbon ayak izi takibi incelenmiştir.

Esnek üstyapı tabakası ve rijit üstyapı tabakası için 1000 araç için yakıt tüketimi temel alınarak, aynı km ve ortamlarda yapılması düşünüldüğü üstyapı kaplaması karbon ayak izi takibi incelenmiştir. Esnek asfalt kaplama tabakası için km'de gerekli asfalt üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> miktarının hesaplanması yapılmıştır. Tüketilen bitüm üretilmesindeki CO<sub>2</sub> emisyonu ve taşınmasındaki CO<sub>2</sub> emisyonu miktarı Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada ilk olarak ilgili yol kesimi için ihtiyaç duyulan uygun değer bitüm miktarı denklem 3.1 kullanılarak 1440 ton asfalt ihtiyacı bulunmuş, %95 oranında agrega miktarı 1368 ton, %5 oranında bitüm 72 ton olarak belirlenmiş ve daha sonrasında ihtiyaç duyulan bitümün üretilmesi esnasında ortaya çıkan CO<sub>2</sub> miktarı esnek üstyapı için birim emisyon miktarı 190 kg/ton (EUPAVE, 2009) CO<sub>2</sub> alınarak 13,68 ton karbondioksit emisyonu hesaplanmıştır.

Malzeme taşınması esnasında esnek üstyapı kaplama tabakası için karbondioksit emisyonu birim miktarı 3,39 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 1440 ton asfalt taşınmasında 4,88 ton karbondioksit emisyonu hesaplanmıştır.

Üstyapı tabakasının yapımında ısıtılarak kurutma ve karıştırma esnasında karbondioksit emisyonu birim miktarı 3,39 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 1440 ton asfalt ısıtılmasında 18,54 ton CO<sub>2</sub> malzemelerin düzgün karıştırılabilmesi amacıyla ısıtma, daha sonra karıştırma esnasındaki ısıtma, kurutma esnasında tüketilen enerji dikkate alınmıştır. Karıştırma, esnek üstyapı kaplama tabakası için karbondioksit emisyonu birim miktarı 2,78 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 1440 ton asfalt karıştırılmasında 4,003 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

Esnek asfalt kaplama tabakasında km'de 1000 araç için yıllık ortalama günlük trafikten kaynaklanan CO<sub>2</sub> salınım miktarı hesaplanabilmesi için ilgili yol kesiminden bir yıl içinde geçen taşıt miktarı dikkate alınmıştır. İş günlerinde her 100 km'de 35 L yakıt tüketimi ile 1000 araç varsayımı yapılmıştır. 1 litre yakıtın yanmasıyla ortalama 2,5 kg'lık CO<sub>2</sub> salınım meydana gelmektedir. Yıllık CO<sub>2</sub> salınımı: 1000 araç ile karayollarında tüketilen 77000 ton benzin, 236,666 Gg CO<sub>2</sub> emisyonu vermektedir. Bu da 236 ton CO<sub>2</sub> emisyonuna eşittir.

Geri kazanım, esnek üstyapı kaplama tabakası için karbondioksit geri kazanımı birim miktarı 3,37 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 1440 ton asfalt geri kazanımında 4,85 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

350 kg/m<sup>3</sup> çimento kullanımında eşitlik 3.1 yardımıyla 210 ton çimento ihtiyacı olduğu hesaplanmıştır, tüketilen çimentonun üretilmesinde birim CO<sub>2</sub> salınım 400 kg/L (EUPAVE, 2009) olması durumunda karbondioksit emisyonu (CO<sub>2</sub>) miktarı 84 ton olarak hesaplanmıştır. Malzeme taşınması esnasında esnek üstyapı kaplama tabakası için bir metreküp için 1833,48 kg/m<sup>3</sup> agrega ihtiyacına göre denklem 3.1 yardımıyla 1100 ton agrega ihtiyacı tespit edilir. Bu agrega taşınmasında karbondioksit emisyonu birim miktarı 5,1 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013)6,68 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

Rijit beton yol üstyapı tabakası yapımında 1100 ton agrega ve 210 ton çimento kullanılmıştır. Toplam karıştırma sırasında 1310 ton malzeme vardır. Karıştırma, esnek üstyapı kaplama tabakası için 1310 ton malzeme karıştırması durumunda karbondioksit emisyonu birim miktarı 3,9 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 5,1 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır. Beton yollar tarafından tekrar karbonlaşmanın sonucu ile geri kazanım, rijit üstyapı kaplama tabakası için geri kazanım karbondioksit emisyonu birim miktarı 0,15 kg/m<sup>3</sup> alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 31,5 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

Beton yollarda 1000 araç ile yıllık ortalama günlük trafikten kaynaklanan karbondioksit emisyonu hesaplanmıştır. Ağır yük şeridini asfalttan betona değiştirmeyi istediğimizi varsayalım. Burada beton yolun asfalt yola oranla yakıt tasarrufu %2.35 (EUPAVE, 2009) ile yıllık CO<sub>2</sub> salınımındaki azalma için asfalt yolda 1000 araçla hesaplanan: beton yolda tüketilen 75190,5 ton benzin, 230,81 Gg CO<sub>2</sub> emisyonu vermektedir. Bu da 230,81 ton CO<sub>2</sub> emisyonuna eşittir.

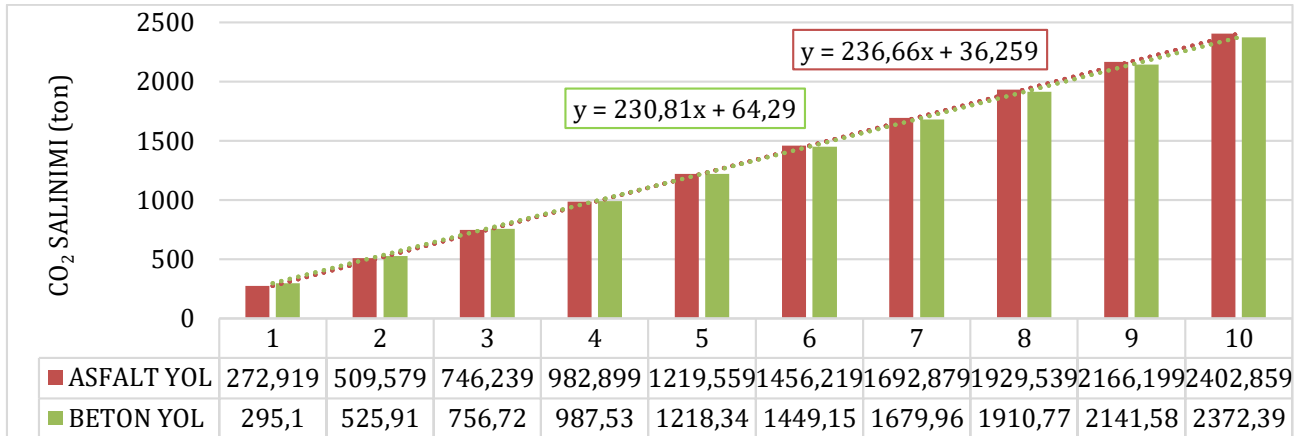
Hazırlanan tablo 1.Yıl, 2.Yıl, 10.Yıl, 20.Yıl ve 40.Yıl için karbon salınım miktarlarını göstermektedir. Salınım 1.Yılsonunda günde 1000 araç ile salınan CO<sub>2</sub> miktarları hesaplanmıştır. Yıllık gün sayısı 220 gün çalışma günü olarak belirlenmiştir. Bu miktar 2.Yıl ve sonraki yıllarda devam ettiği için ilk yılsonundaki toplam CO<sub>2</sub> salınımına eklenerek 2.Yıl, 4.Yıl, 10.Yıl, 20.Yıl ve 40.Yıl içinde salınımlar hesaplanmıştır.

**Tablo 1.** Rijit ve esnek üstyapıların 1000 araç için yaşam dönemi değerlendirmesine göre karbon ayak izinin karşılaştırılması (Comparison of the carbon footprint of rigid and flexible pavements based on life cycle for 1000 vehicles)

KARBON AYAK İZİ-1 Km'lik YOL İÇİN		YILLIK CO <sub>2</sub> SALINIMI(×10 <sup>3</sup> )	
		ASFALT CO <sub>2</sub> / ton	BETON CO <sub>2</sub> / ton
Malzeme temini	Bitüm Üretimi	13.68	
	Çimento Üretimi		84
İnşaat aşaması	Malzemenin Taşınması	4.881	6.681
	Karıştırma	4.003	5.109
	Isıtma ve Kurutma	18.547	
Rutin bakım ve ömür döngüsü	Malzeme Geri Kazanım	-4.852	
	CO <sub>2</sub> depolaması %15		-31.5
	1000 araç ile ömür döngüsü	236.66	230.81
SALINIM 1.YIL		272.91	295.1
SALINIM 2.YIL		509.57	552.91
SALINIM 4.YIL		1219.55	1218.34
SALINIM 10.YIL		2402.85	2372.39
SALINIM 20.YIL		4769.45	4680.49
SALINIM 40.YIL		9502.65	9296.69



Yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında yakıt tasarrufunun ömür döngüsü içerisinde etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir. Bu ulaşılan sonucun önemini anlatabilmek için yakıt tasarrufunun 10 yıllık kümülatif karbondioksit salınımı grafiği çizilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Karbon ayak izi karşılaştırılmasında zamana göre durum grafiği - 1000 araç durumu (State of the carbon footprint comparison by time - 1000 vehicle sample)

Yıllık yakıt tasarrufundan dolayı beton yollarda, asfalt yola oranla CO<sub>2</sub> salınımında azalma Şekil 3'de gösterilmiştir. Karbon salınımı karşılaştırıldığında Asfalt yol için eğilim çizgisi  $y=236,66x+36,259$  rijit üstyapı için eğilim çizgisi  $y=230,81x+64,29$  olarak bulunmuştur. Eğilim çizgileri denklem eşitliği yapıldığında  $x=4,79$  olarak bulunmuştur. Burada 4'üncü yıldan sonra beton yola göre karbon salınımı artmıştır.



Şekil 3. Yakıt tasarrufu etkisi - 1000 araç durumu (Impact of fuel savings - 1000 vehicle sample)

Asfalt yolun 1'inci yıl CO<sub>2</sub> salınımı sabit olup beton yolun asfalt yola oranla %2,35'lik yakıt tasarrufundan kaynaklı her yıl 5.8 ton CO<sub>2</sub> salınımı rijit üstyapı tabakasından düşerek aradaki farkı göstermek için Şekil 3 hazırlanmıştır. Beton yol daha az salınım yapacak hale gelecektir.

KGM (2013), Karbon ayak izi takibi için malzeme temini, inşaat aşaması, rutin bakım ve ömür döngüsü süresinde karbon emisyon takibi Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 Bölüm 400 içerisinde belirtilen kalınlıklara ve malzeme miktarlarına göre yapılmıştır. Esnek üstyapı tabakası ve rijit üstyapı tabakası için üstyapı kalınlıkları göz önüne alınarak üstyapı kaplaması karbon ayak izi takibi incelenmiştir. Esnek asfalt üstyapı da bulunan Aşınma, binder ve bitümlü temel tabakaları için km'de gerekli asfalt üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> miktarının hesaplanması yapılmıştır. 1 km uzunluğunda 4 m genişliğinde ve 23 cm kalınlığında tüketilen bitüm üretilmesindeki CO<sub>2</sub> emisyonu ve taşınmasındaki CO<sub>2</sub> emisyonu miktarı Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada ilk olarak ilgili yol kesimi için ihtiyaç duyulan uygun değer bitüm miktarı Denklem 3.1 kullanılarak 2208 ton asfalt ihtiyacı bulunmuş, %95 oranında agrega miktarı 2097,6 ton, %5 oranında bitüm 110,4 ton olarak belirlenmiş ve daha sonrasında ihtiyaç duyulan bitümün üretilmesi esnasında ortaya çıkan CO<sub>2</sub> miktarı esnek üstyapı için birim emisyon miktarı 190 kg/ton (EUPAVE, 2009) CO<sub>2</sub> alınarak 20,98 ton CO<sub>2</sub> karbondioksit emisyonu hesaplanmıştır.

Malzeme taşınması esnasında esnek asfalt üstyapı da bulunan Aşınma, binder ve bitümlü temel tabaka malzemesi taşınması için karbondioksit emisyonu birim miktarı 3,39 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 2208 ton asfalt taşınmasında 7,48 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır. Üstyapı tabakalarının yapımında ısıtılarak kurutma esnasında karbondioksit emisyonu birim miktarı 12,88 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 2208 ton asfalt ısıtılmasında 28,44 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır. Burada malzemelerin düzgün karıştırılabilmesi amacıyla

ısıtma, daha sonra karıştırma esnasındaki ısıtma, kurutma esnasında tüketilen enerji dikkate alınmıştır. Karıştırma, esnek üstyapı kaplama tabakası için karbondioksit emisyonu birim miktarı 2,78 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 2208 ton asfalt karıştırılmasında 6,14 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

Esnek asfalt kaplama tabakasında km'de 10000 araç için yıllık ortalama günlük trafikten kaynaklanan CO<sub>2</sub> salınım miktarı hesaplanabilmesi için ilgili yol kesiminden bir yıl içinde geçen taşıt miktarı dikkate alınmıştır. İş günlerinde her 100 km'de 35 L yakıt tüketimi ile 10000 araç varsayımı yapılmıştır. 1 litre yakıtın yanmasıyla ortalama 2,5 kg'lık CO<sub>2</sub> salınım meydana gelmektedir. Yıllık CO<sub>2</sub> salınımı: karayollarında tüketilen 770000 ton benzin, 2366,66 Gg CO<sub>2</sub> emisyonu vermektedir. Bu da 2366 ton CO<sub>2</sub> emisyonuna eşittir. Geri kazanım, esnek üstyapı kaplama tabakası için karbondioksit geri kazanımı birim miktarı 3,37 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 2208 ton asfalt geri kazanımında 7,44 ton karbondioksit emisyonu hesaplanmıştır.

Rijit beton kaplama tabakası için km'de gerekli çimento üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> miktarının hesaplanmıştır. Genelde inlemelerde 1 ton çimento üretim sonucunda ortaya çıkan karbondioksit miktarına bakılır. Çimento üretimi sırasındaki CO<sub>2</sub> salınımları 400 kg/L (EUPAVE, 2009) olarak belirlenmiş ve hesaplamalar yapılmıştır. 1 km uzunluğunda tek şeritli 4 m genişliğinde ve 15 cm kalınlığında 350 kg/m<sup>3</sup> çimento kullanımında Denklem 3.1 yardımıyla 210 ton çimento ihtiyacı olduğu hesaplanmıştır, karbondioksit emisyonu miktarı 84 ton olarak hesaplanmıştır.

Malzeme taşınması esnasında esnek üstyapı kaplama tabakası bir metreküp için 1833,48 kg/m<sup>3</sup> agrega ihtiyacına göre Denklem 3.1 yardımıyla 1100 ton agrega ihtiyacı tespit edilir. Bu agrega taşınmasında karbondioksit emisyonu birim miktarı 5,1 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 6,68 ton karbondioksit emisyonu hesaplanmıştır.

Rijit beton yol üstyapı tabakası yapımında 1100 ton agrega ve 210 ton çimento kullanılmıştır. Toplam karıştırma sırasında 1310 ton malzeme vardır.

Karıştırma, esnek üstyapı kaplama tabakası için 1 km uzunluğunda 4 m genişliğinde ve 15 cm kalınlığında tabaka 1310 ton malzeme karıştırması için karbondioksit emisyonu birim miktarı 3,9 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 5,1 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır. Beton yollar tarafından tekrar karbonlaşmanın sonucu ile geri kazanım, rijit üstyapı kaplama tabakası için 1 km uzunluğunda 4 m genişliğinde ve 15 cm kalınlığında tabaka için geri kazanım karbondioksit emisyonu birim miktarı 0,15 kg/m<sup>3</sup> alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 31,5 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

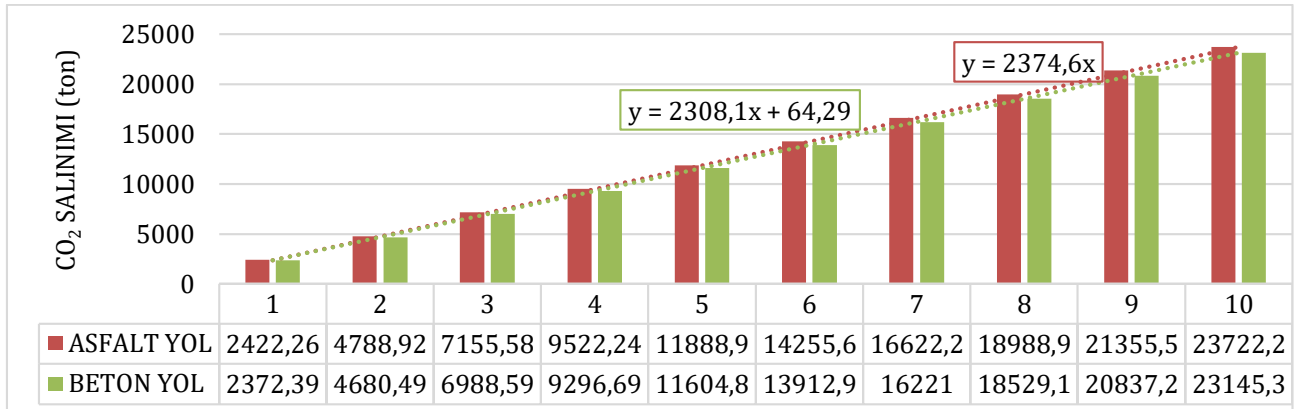
Trafik yoğunluğunu kullanan kaplamayı asfalttan betona değiştirelim. Burada beton yolun asfalt yola oranla yakıt tasarrufu %2.35 (EUPAVE, 2009) ile yıllık CO<sub>2</sub> salınımındaki azalma için beton yolda tüketilen 751905 ton benzin, 2308,1 Gg CO<sub>2</sub> emisyonu vermektedir. Bu da 2308,1 ton CO<sub>2</sub> emisyonuna eşittir.

Tablo 2'de, 1'inci, 2'nci ve 10'uncu yıl için karbon salınım miktarlarını göstermektedir. Salınım 1'inci yıl sonunda günde 10000 araç ile salınan CO<sub>2</sub> miktarları hesaplanmıştır. Yıllık gün sayısı 220 gün çalışma günü olarak belirlenmiştir. Bu miktar 2.Yıl ve sonraki yıllarda devam ettiği için ilk yılsonundaki toplam CO<sub>2</sub> salınımına eklenerek 2'nci, 10'uncu, 20'nci ve 40'uncü yıl içinde salınımlar hesaplanmıştır.

**Tablo 2.** Rijit ve esnek üstyapıların 10000 araç için yaşam dönemi değerlendirilmesine göre karbon ayak izinin karşılaştırılması (Comparison of the carbon foodprint of rigid and flexible pavements based on life cycle for 1000 vehicles)

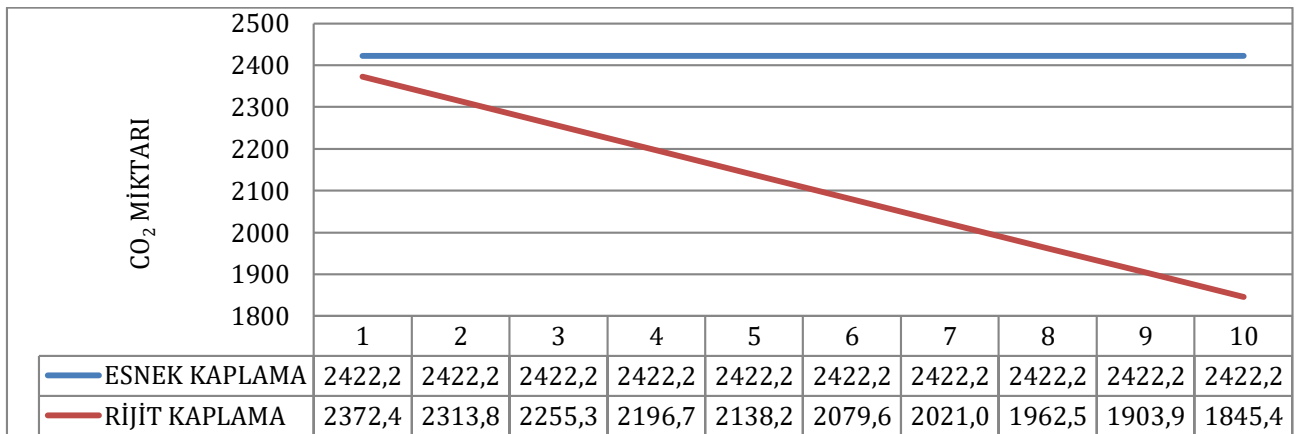
KARBON AYAK İZİ-1 Km'lik YOL İÇİN		YILLIK CO <sub>2</sub> SALINIMI(×10 <sup>3</sup> )	
		ASFALT CO <sub>2</sub> / ton	BETON CO <sub>2</sub> / ton
Malzeme temini	Bitüm Üretimi	20,98	
	Çimento Üretimi		84
İnşaat aşaması	Malzemenin Taşınması	7.48	6.681
	Karıştırma	6.14	5.109
	Isıtma ve Kurutma	28.44	
Rutin bakım ve ömür döngüsü	Malzeme Geri Kazanım	-7.44	
	CO <sub>2</sub> depolaması %15		-31.5
	10000 araç ile ömür döngüsü	2366.6	2308.1
SALINIM 1.YIL		2422.26	2372.39
SALINIM 2.YIL		4788.92	4680.49
SALINIM 10.YIL		23722.2	23145.29
SALINIM 20.YIL		47388.8	46226.29
SALINIM 40.YIL		94722	92388.29

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında yakıt tasarrufunun ömür döngüsü içerisinde etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir. Bu ulaşılan sonucun önemini anlatabilmek için yakıt tasarrufunun 10 yıllık kümülatif karbondioksit salınımı grafiği çizilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Karbon ayak izi karşılaştırılmasında zamana göre durum grafiği - 10000 araç durumu (State of the carbon foodprint comparison by time - 10000 vehicle sample)

Yıllık yakıt tasarrufundan dolayı beton yollarda, asfalt yola oranla CO<sub>2</sub> salınımında azalma Şekil 4'de gösterilmiştir. Karbon salınımı karşılaştırıldığında Asfalt yol için eğilim çizgisi  $y=2374.6x$  rijit üstyapı için eğilim çizgisi  $y=2308.1x+64,29$  olarak bulunmuştur. Eğilim çizgileri denklem eşitliği yapıldığında  $x=0,966$  olarak bulunmuştur. Burada 1'inci yıldan itibaren beton yola göre karbon salınımı artmıştır.



Şekil 5. Yakıt tasarrufu etkisi - 10000 araç durumu (Impact of fuel savings - 10000 vehicle sample)

Asfalt yolun 1'inci yıl CO<sub>2</sub> salınımı sabit olup beton yolun asfalt yola oranla %2,35'lik yakıt tasarrufundan kaynaklı her yıl 58,6 ton CO<sub>2</sub> salınımı rijit üstyapı tabakasından düşerek aradaki farkı göstermek için Şekil 5.'de gösterilen grafik hazırlanmıştır. Beton yol daha az salınım yapacak hale gelecektir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç (Discussion and Conclusion)

Yapılan çalışmada karayollarında karbon ayak izi araştırması ve karşılaştırılması hedeflenmiştir. Karayollarında karbon ayak izi karşılaştırması için yaşam dönemi değerlendirilmesi (YDD) olarak bilinen kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır. Beton ve Asfalt yolların doğrudan (birincil ayak izi ve dolaylı (ikincil ayak izi) takip edilmiştir. IPCC metodolojisi ile teorik hesaplamalar yapılmıştır.

Yapılan ilk çalışmadaki hesaplamalarda esnek yolların yapımı ve 1.yılsunda betona oranla daha az karbon emisyonu olmuştur. Ancak yakıt tasarrufunun karayollarında karbon salınımlarında önemli bir etkisi olduğu anlaşılmıştır. Karbon salınımı yakıt tasarrufunun da etkisi ile yolların servis ömürleri boyunca asfalt yolda, beton yola oranla daha çok karbon salınımı olduğu görülmüştür. Beton yollar sabit hızla giden 1000 araç için yapmış olduğumuz çalışmaya göre 6.yılsunda asfalt yoldan daha az karbon salınımı meydana getirmiştir. Karbon ayak izi takibi ve Yaşam dönemi değerlendirilmesi yaptığımızda beton yollar, asfalt yola göre karbon salınımında(emisyonunda) yüzde 2,35 yakıt tasarrufundan dolayı 4. yılda daha az salınım yapmaya başlamıştır.

İkinci çalışmada ise hesaplamalarda esnek yolların yapımı ve 1'inci yıl itibari ile beton yol tabakası için daha az karbon emisyonu olmuştur. Beton yollar sabit hızla giden 10000 araç için yapmış olduğumuz çalışmaya göre 1'inci yıl hesaplama sonucunda asfalt yoldan daha az karbon salınımı meydana getirmiştir.

Karbon ayak izimizi azaltmak için: Rutin bakımlarda çevre dostu ve daha verimli iş makineleri kullanma, taşınma mesafelerini minimum yapma, taşıma esnasında oluşan karbondioksit salınımını azaltmak için çevreci ve yakıt tasarrufu yapan araçlar tercih edilmelidir. Seyahatlerde toplu taşıma araçları kullanılmalıdır.

Yol yapım çalışmalarının ve dolayısı ile trafik aksamalarının azalmasını ve bunlara bağlı olarak yakıt tüketimin ve egzoz gazı salınımlarının da azalmasında sürdürülebilir üstyapı tabakası kıyaslamasında önemli rol oynadığı tespit edilmiştir. Yaşadığımız dünyada insan faaliyetleri sonucunda çevreyi kirletiyoruz bu durum için önlemler almazsak gelecek kuşaklara yaşanması zor ve tehlikeli bir dünyaya yaşamalarına sebep olacağız. Karbon salınımına sebep olan ülkelere bakıldığında gelişmiş ülkeler daha çok karbon salınımı yapmaktadır. Gelişmiş ülkeler yaşayışlarıyla da gereksiz enerji tüketimine neden olmaktadır. Dünyada kirlenmeye engel olabilmek için yenilebilir enerji ile daha az enerji tüketimi yapan sistemlere geçilmeli ve karbon salınımları azaltılmalıdır. Her insan bu konuda bilgili, duyarlı ve doğru olmak zorundadır çünkü ortak geleceğimiz tehlike altındadır.

Bu çalışmada, esnek üstyapı yapım yöntemlerinden ılık asfalt dikkate alınmamıştır. Ayrıca, katkı maddelerinin kullanımı ve bunların etkisi de değerlendirilmemiştir. Bunun yanında geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı (soğuk geri kazanım, sıcak geri kazanım, tam derinlikte geri kazanım vb.) da sonucu değiştirebilecektir. Benzer şekilde, rijit üstyapılar için de atık malzeme geri kazanımı ve katkı malzemelerinin kullanımı da önemli farklılık doğurabileceği gibi silindire sıkıştırılmış rijit üstyapı, sürekli (continuous) rijit üstyapı vb. imalat usullerinin etkisine de bakılmalıdır.

Son olarak aynı trafik verisi ve kompozisyonuna sahip kesimlerde, farklı zemin özellikleri de sonucu önemli oranda değiştirebilecektir. Bundan sonraki çalışmalarda bu konular da dikkate alınarak her bir kesim ve trafik için karbon ayak izi değerlendirmesinin yapılması, sürdürülebilir bir dünya için gereklidir.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

### Kaynakça (References)

- Akçansa, 2014. Geleceğe ulaşmak için yaşanabilir dünya – 2012-2013 Sürdürülebilirlik Raporu Erişim Tarihi 28.05.2019 [http://www.akcansa.com.tr/downloads/surdurebilirlik/surdurebilirlik\\_2014\\_tr.pdf](http://www.akcansa.com.tr/downloads/surdurebilirlik/surdurebilirlik_2014_tr.pdf)
- Alexander, B., 2009 Carbon Footprint of HMA and PCC Pavements. P Int Conference on Perpetual Pavements, Columbus, Ohio.
- Debroux, R., Kral, Z., Lemlin, M., Wansart, L., Degraeve, M., Haesen, G., & Di Mascio, P. (2007). Bituminous and continuously reinforced concrete pavements for motorways. an economic comparison (part II). [Pavimentazioni Bituminose ed in Calcestruzzo ad Armatura Continua per Autostrade. un Confronto Economico (II Parte)] Industria Italiana Del Cemento, 77(830), 288-299.
- Anonim, 2009, Highways Agency Carbon Calculation Tool, December, – Instruction Manual – Version 5c,
- Çimsa, 2013. Sürdürülebilirlik Raporu Erişim Tarihi 28.05.2019 <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8/A91AF70B800B4FD0AF5DA989D7A39534.pdf>
- Diler 2006, Şehir İçi Toplu Taşımacılıkta Kullanılan Otobüslerde Doğal Gaz Kullanımının Karbon Dioksit Emisyonlarına Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Eupave, 2009, Concrete Roads: a Smart and Sustainable Choice. September
- Haines, A., Kovats R.S., Campbell-Lendrum D., Corvalan C., 2006. Climate Change and Human Health: Impacts, Vulnerability and Public Health, The Lancet, 9528, 2101-2109
- IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- Karaçor, E. K., Yerli, Ö., Gültekin, P. G., & Özdede, S.,2010, peyzaj tasarımında kullanılan yapısal elemanların karbon ayak izlerinin değerlendirilmesi.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi, Ankara
- Kjellsen, K.O., Guimaraes, M. and Nilsson, A., 2005. The CO<sub>2</sub> balance of concrete in a life cycle perspective. Danish Technological-DTI.
- Pekin, M. A., 2006. Ulaştırma Sektöründen Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonları, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Tektanıl 2008, Toplu Taşımadaki Doğalgazlı Otobüslerin Karbondioksit Emisyonlarına Etkileri Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Temren Z., Sönmez İ., 2013, Asfalt ve Beton Karışımların İmalatında Enerji Tüketimi ve Karbon Ayak İzi İle İlgili Bir Çalışma, 6.Ulusal Asfalt Sempozyum ve Sergisi, 27-28 Kasım, Ankara.
- TUİK 2015. TUİK Sera Gazı Emisyon İstatistikleri. Erişim Tarihi 28.05.2019 [www.tuik.gov.tr/PdfGetir.do?id=24588](http://www.tuik.gov.tr/PdfGetir.do?id=24588)
- TUİK 2018. TUİK Sera Gazı Envanteri. Erişim Tarihi 28.05.2019 <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=21582>



## AHŞAP MALZEMELERİN ISLANABİLİRLİK ÖZELLİĞİ ÜZERİNE ISIL İŞLEM UYGULAMASININ ETKİSİ

Şemsettin KILINÇARSLAN\*, Yasemin ŞİMŞEK TÜRKER

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Isıl İşlem,  
Islanabilirlik,  
Ahşap Malzeme,  
Temas Açısı.*

### Öz

Ahşap malzeme yapılar da kullanılan en eski yapı malzemelerinden biridir ve birçok alanda kullanılmaktadır. Ancak bu malzemenin hidrofilik bir malzeme olması kullanım alanını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle geliştirilmiş birçok odun modifikasyon yöntemleri bulunmaktadır. Bu odun modifikasyon yöntemlerinden biri de ahşap malzemenin ısı işleme tabi tutulmasıdır. Ahşap malzemenin ısı işleme tabi tutulması çevre dostu bir ağaç koruma yöntemi olmasından dolayı büyük ilgi görmektedir. Isıl işleme tabi tutulmamış ahşap malzeme hidrofilitir. Ancak ısı işleme tabi tutulduktan sonra ahşap malzeme hidrofobik özellik kazanmakta ve biyolojik saldırılara karşı daha dirençli hale gelmektedir. Ayrıca, ısı işlem görmemiş malzemeye kıyasla boyutsal olarak daha kararlı hale gelmektedir. Isıl işlem, farklı ağaç türlerinden elde edilen odunlar üzerinde farklı etkiler oluşturmaktadır. Isıl işlem görmüş ahşabın ıslanma özelliklerinin incelenmesi, ahşap malzemenin hidrofobiklik özelliği üzerine ısı işlem etkilerinin incelenmesinde iyi bir göstergedir. Bu çalışmanın amacı, ısı işlem görmüş Sedir ve Iroko ağaç türünün dinamik ıslatma özelliklerini incelemektir. Çalışmada elde edilen veriler ısı işlem uygulanmış örneklerin temas açısı değerlerinin kontrol örneklerine göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, ısı işlem uygulamasının ağaç malzemenin ıslanabilirlik özelliğini azalttığı söylenebilmektedir.

## THE EFFECT OF HEAT TREATMENT APPLICATION ON WETTABILITY PROPERTIES OF WOOD MATERIALS

### Keywords

*Heat Treatment,  
Wettability,  
Wood Material,  
Contact Angle.*

### Abstract

Wood is one of the oldest building materials used in buildings and is used in many areas. However, the fact that this material is a hydrophilic material limits its use. Therefore, many improved wood modification methods are available. One of these wood modification methods is the heat treatment of wood. Heat treatment of wood is great interest as it is an environmentally friendly tree protection method. The unheat-treated wood is hydrophilic. However, after heat treatment, the wood material becomes hydrophobic and becomes more resistant to biological attack. It also becomes dimensionally more stable than unheat-treated material. Heat treatment creates different effects on woods obtained from different tree species. The examination of the wettability properties of the heat treated wood is a good indicator for the heat treatment effects on the hydrophobicity of the wood material. The aim of this study is to examine the dynamic wettability properties of a tree with a thermally treated Cedar and Iroko. The data obtained from the study showed that the contact angle values of the samples were higher than the control samples. Therefore, it can be said that the heat treatment application reduces the wettability of the wood material.

### Alıntı / Cite

Kılınçarslan, Ş., Şimşek Türker, Y., (2020). Ahşap Malzemelerin Islanabilirlik Özelliği Üzerine Isıl İşlem Uygulamasının Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 460-466.

\* İlgili yazar / Corresponding author: semsettinkilincarslan@sdu.edu.tr, +90-246-211-1206

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
Ş. Kılınçarslan, 0000-0001-8253-9357	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	25.05.2019
Y. Şimşek Türker, 0000-0002-3080-0215	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	24.12.2019
	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	23.01.2020
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Ahşap malzeme, sürdürülebilir ve yenilenebilir bir malzeme olması sebebiyle eski çağlardan beri farklı uygulama alanlarında kullanılan güvenilir bir yapı malzemesidir (Kılınçarslan ve Şimşek Türker, 2020a). Ancak ağaç malzemenin çevre etkisi sonucunda şişmesi veya daralması ve biyolojik zararlıların (böcek ve mantar) etkisi ile deforme olması en sık rastlanılan endüstriyel problemlerden biridir (Stamm vd., 1946; Kılınçarslan ve Şimşek Türker, 2020b). Ağaç malzeme üzerinde oluşan deformasyonları ortadan kaldırabilmek amacıyla çeşitli kimyasal malzemenin ağaç malzemeye nüfuz ettirilmesi (emprenye) yaygın olarak kullanılan odun modifikasyon yöntemidir (Stamm vd., 1946). Ağaç malzemenin kimyasallar ile muamele edilmesi, pratik olarak uygulanabilmesi, ağaç malzemeye biyolojik zararlılara karşı direnç kazandırması gibi olumlu yönleri olmasına karşın kimyasal (toksik) maddeler içermesi, sürekli bakım gerektirmesi, yüksek maliyetli olması gibi olumsuz özellikleri de mevcuttur. Günümüzde sürdürülebilir yapı malzemeleri bilincinin artmasıyla birlikte kimyasal malzemelerle uygulanan modifikasyon yöntemlerinin özellikle zehir etkileri sebebiyle hem doğa hem de ürün kullanımı sırasında kullanıcıların üzerindeki olası etkileri sorgulanmaya başlamıştır. Bu durum, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir yapı malzemesi niteliği taşıyan ağaç malzemelerin korunması için farklı odun koruma yöntemlerinin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

Isıl işlem, ağaç malzemedeki boyutsal kararlılığın sağlanması ve malzemeyi biyolojik zararlılara karşı korumak için toksik maddelerin kullanımına alternatif bir modifikasyon yöntemidir (Hill, 2006; Garcia vd., 2012). Ahşap malzemenin ısı ile tabii tutulması bilimsel olarak ilk kez 1930 yılında Almanya'da Stamm ve Hansen tarafından gerçekleştirilmiştir. 1940 yılında Amerika'da White, 1950 yılında Almanya'da Bayendam, Rundel ve Buro ısı işlem uygulaması üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Kollman ve Schnoider 1960 yılında bu konu üzerine elde ettikleri bilgileri yayınlamış ve ısı işlem konusu bilim insanları tarafından tartışılmaya başlanmıştır. Odun modifikasyonu konusu üzerine yapılan çalışmalar 1990 yıllarından sonra Fransa, Hollanda ve Finlandiya'da bilim insanları tarafından daha detaylı olarak yapılmıştır. Günümüzde endüstride "Thermowood" olarak bilinen ısı işlem metodu farklı ülkelerde çeşitli isim ve yöntemler ile adlandırılmaktadır. Bu ısı işlem metodları; ağaç malzemeye ısıtmak amacıyla buhar verilmesi Finlandiya (Thermowood) metodu, buhar ile sıcak havanın aynı zamanda kullanıldığı Plato metodu, inert gaz kullanılarak uygulanan Fransız (Rectification) metodu ve sıcak yağ ile gerçekleştirilen Alman (OHT) metodudur (Mayes ve Oksanen, 2002).

Isıl işlem uygulaması ahşap malzemenin yapısında bazı değişimler meydana getirmektedir. Bu değişimlerden birincisi, hemiselülozlar en düşük molekül ağırlığına sahip olduklarından yüksek sıcaklıklarda bozulmaya başlar. Hemiselülozların bozulması OH bağlarının azalmasına ve O-asetil gruplarının birleşmesine neden olmaktadır. Odun lifleri arasında meydana gelen çapraz bağ oluşumuyla, ahşap daha hidrofobik hale gelmektedir. Su emilimindeki azalma, ahşabın şişmesi ve büzülmesinde bir azalmaya neden olmakta ve gelişmiş boyutsal stabiliteye yol açmaktadır (Kocaefe vd., 2008). Isıl işleme tabi tutulmuş bir malzemenin boyutsal stabilitesinin arttığı hususunda ilk olarak 1940 ve 1950 yılları arasında Stamm tarafından gözlemlenmiştir gözlemlenmiştir (Stamm vd., 1946, Stamm, 1956). Homan vd., (2000) yapmış olduğu çalışmada ladin vecam ağacının termal modifikasyon uygulaması sonucunda dayanıklılık, higroskopiklik, boyutsal stabilite ve UV direncinin arttığını, ancak mekanik özelliklerinin bozulduğunu tespit etmişlerdir. Hinterstoisser vd.. (2003) ısı işlem uygulanmış kayın ağacında meydana gelen kimyasal değişiklikleri incelemiş ve hemiselülozların sıcaklık ve süre arttıkça bozunmaya uğradığını gözlemlenmişlerdir. Pavlo ve Niemz (2003), yüksek sıcaklıklarda ladin ağaç türünden elde edilen malzemeye uygulanan ısı işlem uygulamasının rengi kararttığını, boyutsal stabiliteyi artırdığını ancak mekanik özelliklerini bozduğunu tespit etmişlerdir. Boyutsal stabilitenin iyileştirilmesi ve hemiselüloz muhtevasının azalması sonucunda odunun higroskopik davranışının da azaldığı bilinmektedir. Duchez vd. (2001) de yapmış olduğu çalışmada boyutsal stabilite ve hemiselülozların bozunması arasındaki bağlantıyı açıklamıştır. Ağaç malzemenin ısı işlem uygulaması ile birlikte daha hidrofobik hale gelmesi beklenmektedir. Uygulama sonucunda malzemedeki meydana gelen kimyasal değişiklikler nedeniyle temas açısı artmaktadır (Kocaefe vd., 2008). Kocaefe vd. (2008), çalışmalarında dişbudak ve akçağaç örneklerinin ıslanabilirlik özelliği üzerine ısı işlem uygulamasının etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında farklı sıcaklıklarda (205 ° C, 210 ° C ve 215 ° C) ısı işlem uygulanmış akçağaç ve dişbudak örneklerinin eksenel yönde temas açılarını belirlemişlerdir. Isıl işleme tabi tutulmuş örneklerde temas açısı değerlerinin daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Hakkou vd., (2005) yapmış oldukları çalışmada ısı işlem uygulanan kayın ağacının hidrofobikliğinin arttığını tespit etmişlerdir. ıslanabilirlikteki değişimin, serbest suyun veya ligninin plastikleştirilmesinin bir sonucu olduğunu belirtmektedirler. Petrissans vd. (2003) kimyasal ve ısı işlem uygulaması ile işlem görmüş ladin kavak, kayın ve

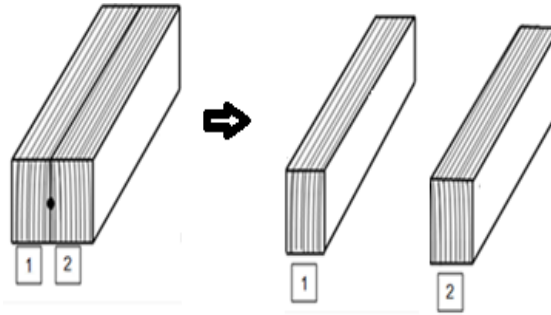
çam ağaç malzemenin ıslanabilirliği üzerine yapmış oldukları çalışmada, ısı işlem görmüş malzemelerde daha yüksek oranda hidrofobikliğin arttığını belirlemişlerdir.

Yukarıda açıklandığı gibi, ısı işlem görmüş ahşabın higroskopik özelliği azaltılmakta, boyutsal stabilitesi ve biyolojik zararlılara karşı direncinin iyileştirilebilirliği arttırılmaktadır. Ancak ısı işlem uygulamasının etkinliği; odun türleri, odun özellikleri, kimyasal ve anatomik özellikleri, başlangıçtaki nem muhtevası ve işlem parametreleri (sıcaklık ve zaman) ve ağaç malzeme yönüne bağlıdır (Brunetti vd., 2007; Esteves vd., 2007; Garcia vd., 2008; Kamdem vd., 2002; Unsal ve Ayrilmis 2005). Bir sıvının (su, boya, tutkal) yüzeye yapışıp yapışmayacağını belirleyen iki önemli yüzey özelliği, ıslanabilirlik ve yüzey enerjisidir. Islanma kalitesi, odun makroskobik özellikleri (gözeneklilik, yüzey pürüzlülüğü, nem içeriği vb.) dahil olmak üzere birçok faktörden etkilenmektedir. Ağaç malzemenin ıslanabilirliğinin ölçümü için çeşitli teknikler mevcuttur (Walinder ve Johansson 2001, Walinder ve Strom 2001, Shi vd., 1997). En çok bilinen ve yaygın olarak kullanılan yöntem damla tekniğidir (Neumann ve Spelled 1996). Temas açısı, damla tekniği kullanılarak yapılan ıslatma deneyi sırasında kaydedilen damla görüntüsünden doğrudan belirlenebilir (Cengiz, 2010). Temas açısı, sıvı damlasıyla katı yüzey arasında oluşan açı olarak tanımlanır ve sıvının ıslatma özelliğinin bir ölçüsüdür. Bir malzeme yüzeyine damlatılan sıvının temas açısı küçüldükçe ıslanabilirlik özelliği artmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, ısı işleme tabi tutulan Sedir (*Cedrus Libani*) ve Iroko (*Chlorophora excelsa*) odunlarının teğet ve radyal yönde dinamik ıslatma özelliklerini incelemek ve ısı işlem tabi tutulmayan örnekler ile karşılaştırmaktır. Bununla birlikte, literatürde iğne yapraklı bir ağaç türünün dinamik ıslatma özelliği üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma ile birlikte literatüre önemli bir katkı sağlanması amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

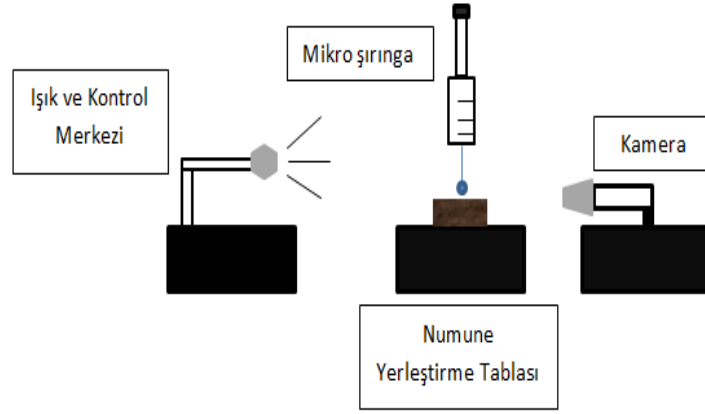
Bu çalışmada, materyal Sedir (*Cedrus Libani*) ve Iroko (*Chlorophora excelsa*) odunları kullanılmıştır. Kerestelerde bazı kusurların (lif kıvrıklığı, çatlak, budak, çürük vb.) bulunmamasına dikkat edilmiştir. Temin edilen kerestelerin kesim planı şematik görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Kerestelerin kesim planı görüntüsü, 1: Isıl işleme tabi tutulmayan kereste (Kontrol) 2: Isıl işleme tabi tutulan kereste (İşlem) (Cutting plan view of timber, 1: Unheat-treated timber (Control) 2: Heat-treated timber (Treatment))

Şekilde 1'de görüldüğü gibi kereste iki parçaya ayrılmıştır ve kerestenin ikinci parçası ısı işlem uygulamasına tabii tutulmuştur. Sedir ve Iroko keresteleri deney yapılmak üzere Süleyman Demirel Üniversitesine getirilmiştir. Yüzey ıslanabilirlik deneyi yapılmak üzere keresteler (kontrol ve işlem) 20x20x30mm (kalınlık x genişlik x uzunluk) boyutlarında motorlu kıl testere ile kesilmiştir. Sedir örneklerinden 30 (15 kontrol-15 işlem), İroko örneklerinden 30 (15 kontrol-15 işlem) olmak üzere toplam 60 örnek üzerinde çalışılmıştır.

Örnekler boyutlandırıldıktan sonra yüzey düzgünlüğünün elde edilmesi amacıyla kum kağıt zımpara ile örneklerin yüzeyleri zımparalanmıştır. İşlem ve kontrol grubu kerestelerden elde edilen deney örnekleri (20x20x30 mm boyutlarında) iklimlendirme dolabına alınarak  $20 \pm 2$  °C ve % 65  $\pm$  5 bağıl nem koşullarında değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar bekletilmiştir. Çalışmada Sedir ve İroko odunlarının yüzey ıslanabilirliğini belirlemek amacı ile temas açısı değerleri belirlenmiştir. Temas açısı değerlerini belirlemek amacıyla kullanılan deney düzeneği şematik görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.



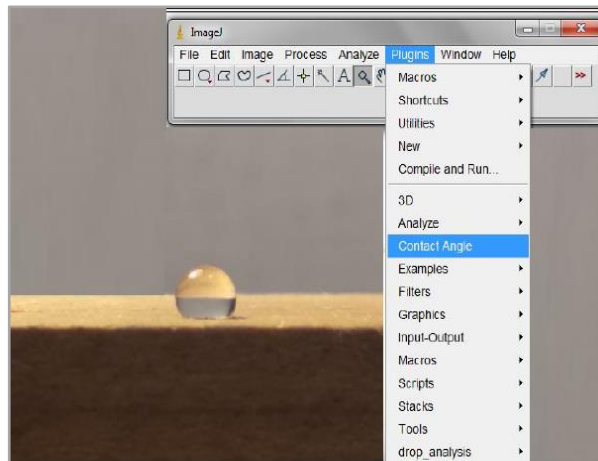
Şekil 2. Temas açısı tespit etme deney düzeneği (Contact angle detection experiment setup)

Örneklerin üzerine 20°C sıcaklığa ve 72,80 mN/m yüzey gerilimine sahip destile edilmiş su uygulama yüzeyine bir şırınga yardımıyla 5 µl kadar damlatılmıştır. Su damlası yüzeye damlatıldıktan sonra 5 sn aralıklar ile 30 sn. boyunca görüntüler alınmıştır (Kocaefe vd. 2008; Kılınçarslan ve Şimşek, 2019). Odun örneği üzerine damlatılan 5 µl'lik su damlası görüntüsü Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. 5 µl'lik su damlası görüntüsü (5 µl water drop view)

Görüntüler elde edildikten sonra temas açısını ölçmek amacıyla birçok program kullanılmaktadır. Bu programlardan en yaygın olarak kullanılanı "Image J" görüntü analiz programıdır. Elde edilen görüntüler bilgisayar ortamına aktarılmış ve Image J görüntü analiz programı ile temas açısı değerleri belirlenmiştir (Şekil 4).



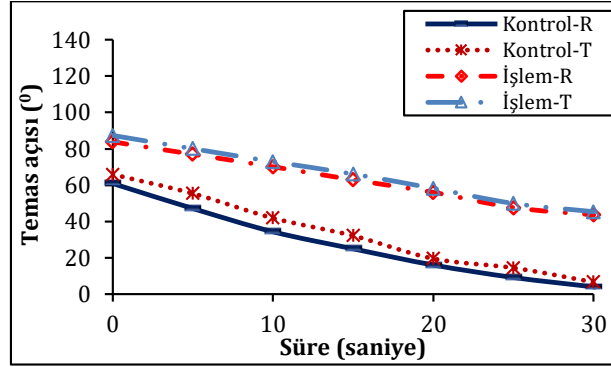
Şekil 4. Image J görüntü analiz programında temas açısının belirlenme (Determination of the contact angle in Image J image analysis program)

Görüntü analiz programı (Image J) kullanılarak elde edilen temas açısı değerleri ile karşılaştırma tabloları oluşturulmuştur.

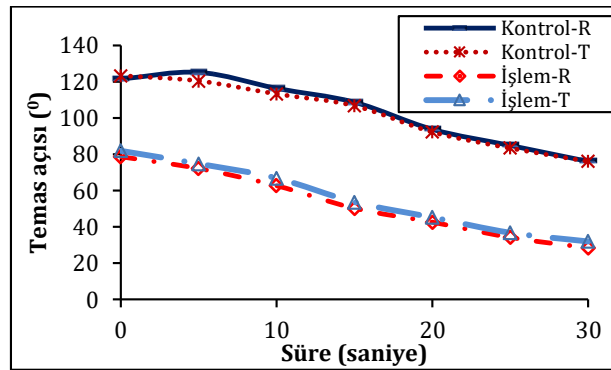


### 3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Sedir örnekleri (Kontrol-İşlem) ve İroko (Kontrol-İşlem) deney örneklerine ait teğet (T) ve radyal (R) yönde temas açısı değerleri Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Sedir deney örneklerinin temas açısı değerleri (Contact angle values of Cedar test samples)



Şekil 6. İroko deney örneklerinin temas açısı değerleri (Contact angle values of Iroko test samples)

Ahşap malzeme, anizotropik bir malzemedir ve özellikleri radyal, teğet ve eksenel yönlerde farklılık göstermektedir (Korkut ve Kocaefe, 2009; Efe ve Bal, 2016; Bal vd., 2012; Uluata, 2011). Ahşap malzemenin yönlerine göre özelliklerinin değişimi temas açısı değerlerinden de açıkça görülmektedir (Şekil 5 ve Şekil 6).

Şekil 5 ve Şekil 6'da görüldüğü gibi kontrol örnekleri ile karşılaştırıldığında, ısı işlem uygulanan örneklerinin temas açısı değerleri daha yüksek olarak belirlenmiştir. Kocaefe vd. (2008), yapmış oldukları çalışmalarda ısı işlem uygulanmış malzemede ıslanabilirliğin azaldığını belirtmektedirler. Sedir kontrol ve işlem örneklerine ait ortalama temas açısı değerleri, standart sapma ve varyasyon katsayısı değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Sedir örneklerine ait ortalama temas açısı, standart sapma ve varyasyon katsayısı değerleri (Average contact angle, standard deviation and coefficient of variation of cedar samples)

	Ortalama						
	0	5	10	15	20	25	30
<b>K (R)</b>	60,95	47,12	34,27	24,88	15,93	9,04	3,85
<b>K (T)</b>	65,91	55,39	41,86	32,16	19,57	14,46	6,66
<b>İ (R)</b>	83,84	76,99	70,09	62,88	55,99	47,56	43,53
<b>İ (T)</b>	87,35	80,02	72,87	66,06	58,15	49,84	45,27
	Standart Sapma						
	0	5	10	15	20	25	30
<b>K (R)</b>	9,66	12,38	11,23	9,18	7,15	6,37	4,69
<b>K (T)</b>	8,08	11,50	11,25	10,00	7,82	5,59	4,06
<b>İ (R)</b>	8,62	9,48	10,44	10,64	11,93	13,47	13,60
<b>İ (T)</b>	9,03	9,89	10,74	11,83	12,19	13,75	13,91
	Varyasyon Katsayısı						
	0	5	10	15	20	25	30
<b>K (R)</b>	0,16	0,26	0,33	0,37	0,45	0,70	1,22
<b>K (T)</b>	0,12	0,21	0,27	0,31	0,40	0,39	0,61
<b>İ (R)</b>	0,10	0,12	0,15	0,17	0,21	0,28	0,31
<b>İ (T)</b>	0,10	0,12	0,15	0,18	0,21	0,28	0,31

R: Radyal Yüzey, T: Teğet Yüzey, K: Kontrol, İ: İşlem

İroko kontrol ve işlem örneklerine ait ortalama temas açısı değerleri, standart sapma ve varyasyon katsayısı değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** İroko örneklerine ait ortalama temas açısı, standart sapma ve varyasyon katsayısı değerleri (Average contact angle, standard deviation and coefficient of variation of Iroco samples)

		Ortalama						
		0	5	10	15	20	25	30
K (R)		79,01	76,88	75,35	73,13	71,18	69,40	67,81
K (T)		82,93	80,08	77,56	75,41	73,17	70,91	69,67
İ (R)		109,74	107,84	105,38	102,37	99,65	97,65	96,46
İ (T)		113,67	110,88	108,50	105,40	102,61	100,24	98,57
		Standart Sapma						
		0	5	10	15	20	25	30
K (R)		2,73	2,47	2,34	3,58	4,27	5,11	5,38
K (T)		3,37	3,02	2,61	3,23	3,97	4,75	4,83
İ (R)		4,48	4,06	4,02	2,82	2,93	3,76	3,90
İ (T)		5,08	4,79	4,40	3,70	3,09	4,09	4,17
		Varyasyon Katsayısı						
		0	5	10	15	20	25	30
K (R)		0,03	0,03	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08
K (T)		0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07
İ (R)		0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04
İ (T)		0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04

R:Radyal Yüzey, T:Teğet Yüzey, K:Kontrol, İ: İşlem

Bu çalışmada elde edilen veriler incelendiğinde, ısı işlem uygulanan Sedir odun türünden elde edilen örneklerin 30. saniyenin sonunda (en düşük) teğet yönde ortalama temas açısı değeri  $45,27^\circ$ , radyal yönde ortalama temas açısı değeri  $43,53^\circ$ ’dir. İşlem uygulanmayan Sedir örneklerinin 30. saniyenin sonunda (en düşük) teğet yönde ortalama temas açısı değeri  $6,66^\circ$  iken, radyal yönde ortalama temas açısı değeri  $3,85^\circ$ ’dir. Isıl işlem uygulanan İroko odun türünden elde edilen örneklerin 30. saniyenin sonunda (en düşük) teğet yönde ortalama temas açısı değeri  $98,57^\circ$ , radyal yönde ortalama temas açısı değeri  $96,46^\circ$ ’dir. İşlem uygulanmayan İroko örneklerinin 30. saniyenin sonunda (en düşük) teğet yönde ortalama temas açısı değeri  $69,67^\circ$  iken, radyal yönde ortalama temas açısı değeri  $67,81^\circ$ ’dir.

#### 4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, ısı işlem yöntemiyle işlem uygulanan bir iğne yapraklı (Sedir (*Cedrus Libani*)) ve bir yapraklı (İroko (*Chlorophora excelsa*)) ağaç türlerinden elde edilen örneklerin teğet ve radyal kesitlerinde dinamik ısılatma özellikleri belirlenmiştir.

Elde edilen verilerin tümü değerlendirildiğinde (0. sn-30. sn), ısı işlem uygulanan sedir örneklerinin temas açısı değerlerinde azalma miktarı teğet yönde % 42,94, radyal yönde ise % 43,27’dir. İşlem görmemiş sedir örneklerinde bu azalma miktarı teğet yönde % 78,07, radyal yönde ise % 85,16’dir. Isıl işlem uygulanan İroko örneklerinin temas açısı değerlerinde azalma miktarı teğet yönde % 11,81, radyal yönde ise % 11,02’dir. İşlem görmemiş İroko örneklerinde bu azalma miktarı teğet yönde % 14,50, radyal yönde ise % 12,16’dir. Bu değerler de ısı işlem uygulamasının ağaç malzemenin ıslanabilirliğini azalttığını göstermektedir. Çalışmada ısı işlem uygulamasının her iki ağaç türünün ıslanabilirlik özelliği üzerine etkisi olduğu belirlenmiştir. Ancak özellikle ısı işlem görmüş sedir odun örneklerinin ıslanabilirlik özelliklerinin önemli oranda etkilendiği tespit edilmiştir.

Çalışmada, ısı işlem uygulanmış örneklerin temas açısı değerleri, kontrol örnekleri temas açısı değerlerine göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Dolayısıyla, ısı işlem uygulamasının ağaç malzemenin ıslanabilirlik özelliğini azalttığı söylenebilmektedir. Çalışılan iki tür arasında kıyaslama yapıldığında, İroko örneklerinin ıslanabilirlik özelliğinin Sedir örneklerine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ancak ısı işlem uygulamasının Sedir örnekleri üzerinde daha etkili olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda, ısı işlemi uygulanan ağaç malzemelerin dış hava şartlarında kullanımı işleme tabi tutulmayan ağaç malzemeye oranla daha elverişli olacaktır.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma FDK-2019-6950 proje kodlu SDÜ BAP projesi ve YÖK 100/2000 doktora programı “Sürdürülebilir Yapı Malzemeleri ve Teknolojileri” tematik alanı kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar SDÜ BAP birimi, YÖK ve YÖK 100/2000 program çalışanlarına teşekkür ederler.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Bal, B. C., Bektaş, İ., Özdemir, F. 2012. Masif ve Lamine Ağaç Malzemelerin Isıl Genleşme Katsayıları Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma. *Düzce Üniversitesi Ormanlık Dergisi*, 8(1), 77-83.
- Brunetti M., Cremonini C., Crivellaro A., Feci E., Palanti S., Pizzo B., Santoni I., Zanuttini R. 2007. Thermal treatment of hardwood species from Italian plantations: preliminary studies on some effects on technological properties of wood. In: International scientific conference on hardwood processing, Quebec City, 24-26 Sep. Available at [http://www.ischp.ca/FR/pdf/ISCHP\\_proceedings.pdf](http://www.ischp.ca/FR/pdf/ISCHP_proceedings.pdf). Accessed 26 Feb 2009.
- Cengiz, O. 2010. Temas Açısı Ölçüm Cihazı Tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 83s.
- Duchez, L., Herri, J.M., Guyonnet, R. 2001. Modelisation d'un Four de Retification du Bois. In: Proceedings of 8<sup>ème</sup> Congrès franco-phonien en Genie des Procédés, Nancy, 17 au 19 Octobre 2001 (Groupe ENSIC 2001), pp 61-68.
- Efe, F. T., Bal, B. C. 2016. Yüksek Sıcaklıkta Isıl İşlem Görmüş Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) Odununun Sertlik Değerlerinde Meydana Gelen Değişmeler. *AKÜ FEMÜBİD*, 16, 79-86.
- Esteves, B., Marques A.V., Domingos I., Pereira H. 2007. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Sci Technol* 41(3), 193-207.
- Garcia, R. A., de Carvalho, A. M., de Figueiredo Latorraca, J. V., de Matos, J. L. M., Santos, W. A., de Medeiros Silva, R. F. 2012. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. *Wood Science and Technology*, 46(1-3), 41-52.
- Garcia, R.A., Riedl, B., Cloutier, A. 2008. Chemical modification and wetting of medium density fibreboard produced from heat-treated fibres. *J Mater Sci* 43, 5037-5044.
- Hakkou, M., Petrissans, M., Zoulalian, A., Gerardin, P. 2005. Investigation of Wood Wettability Changes During Heat Treatment on the Basis of Chemical Analysis. *Polym Degrad Stabil* 89, 1-5.
- Hill, C.A.S., 2006. Wood Modification, Chemical, Thermal and Other Processes, John Wiley&Sons Ltd., England.
- Hinterstoisser, B., Schwanninger, M., Stefke, B., Stingl, R., Patzelt, M. 2003. Surface Analyses of Chemically and Thermally Modified Wood by FT-NIR. In: van Acker J, Hill C (eds) The 1st European Conference on Wood Modification, Proceeding of the First International Conference of the European Society for Wood Mechanics, April 2nd to 4th 2003, Ghent, Belgium, pp 65-70.
- Homan, W., Tjeerdsma, B., Beckers, E., Joressen, A. 2000. Structural and Other Properties of Modified Wood. Congress WCTE, Whistler, Canada 3.5.1-1-3.5.1-8.
- Kamdem, D.P., Pizzi, A., Jermannaud, A. 2002. Durability of Heat-Treated Wood. *Holz Roh Werkst* 60, 1-6.
- Kılınçarslan, Ş., Şimşek, Y. 2019. Determination of Contact Angle Values of Heat-treated Spruce (*Picea abies*) Wood with Image Analysis Program. *Biomed J Sci & Tech Res* 18(4), DOI: 10.26717/BJSTR.2019.18.003183.
- Kılınçarslan, Ş., Şimşek Türker, Y. 2020a. Physical-Mechanical Properties Variation with Strengthening Polymers. *Acta Physica Polonica A*, 137(4), 566-568.
- Kılınçarslan, Ş., Şimşek Türker, Y. 2020b. Investigation of Wooden Beam Behaviors Reinforced with Fiber Reinforced Polymers. *Organic Polymer Material Research*, 2 (1), DOI: <https://doi.org/10.30564/opmr.v2i1.1783>.
- Kocaefe, D., Poncsak, S., Doré, G., Younsi, R. 2008. Effect of heat treatment on the wettability of white ash and soft maple by water. *Holz als roh-und werkstoff*, 66(5), 355-361.
- Kocaefe, Poncsak, Doré, Younsi 2008. Effect of Heat Treatment on The Wettability Of white Ash and Softmaple By Water. *Holz Roh Werkst* (2008) 66, 355-361.
- Korkut, S., Kocaefe, D. 2009. Isıl işlemin odun özellikleri üzerine etkisi. *Düzce Üniversitesi Ormanlık Dergisi*, 5(2), 11-34.
- Mayer, D. and Oksanen, O., 2002., "Thermowood Handbook", Finnforest, Finland, 5-15.
- Neumann, A.W., Spelt, J.K. (eds) (1996) Applied Surface Thermodynamics (Surfactant series v. 63). Marcel Dekker Inc, New York.
- Pavlo, B., Niemz, P. 2003. Effect of Temperature on Color and Strength of Spruce Wood. *Holzforschung* 57,539-546.
- Petrissans, M., Gerardin, P., El Bakali, I., Serraj, M. 2003. Wettability of Heat-Treated Wood. *Holzforschung* 57,301-307.
- Shi, Q., Gardner, D.J., Wang, J.Z. 1997. Surface Properties of Polymeric Automobile Fluff Particles Characterized by Inverse Gas Chromatography and Contact Angle Analysis. In: Int. Conf. of Woodfiber-Plast. Compos. 4th Forest Product Society, Madison, USA, pp 245-256.
- Stamm, A.J. 1956. Thermal Degradation of Wood and Cellulose. *Ind Eng Chem* 48, 413-417.
- Stamm, A.J., Burr, H.K., Kline, A.A. 1946. Staywood-Heat-Stabilized Wood. *Ind Eng Chem* 38, 630-634.
- Uluata, A. R. 2011. Ağaç malzemenin mekanik özelliklerine etki eden faktörler. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 18(1-4).
- Unsal, O., Ayrilmis, N. 2005. Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood. *J Wood Sci* 51, 405-409.
- Walinder, M.E.P., Johansson, I. 2001. Measurement of Wood Wettability by the Wilhelmy Method. *Holzforschung* 1(55), 21-32.
- Walinder, M.E.P., Strom, G. 2001. Measurement of Wood Wettability by the Wilhelmy Method. *Holzforschung* 2(55), 33-41.



## ZAMAN VE FREKANS DÜZLEMİNDE YORULMA ÖMRÜ HESAPLAMA YÖNTEMLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Ömer Faruk DEMİRKAYA\*, Kenan TÜFEKÇİ

Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Böl. Bursa, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Rainflow Yöntemi, Dirlik Yöntemi, Titreşim Kaynaklı Yorulma, Rastlantısal Titreşim, Yorulma.</i>	Maruz kalınan titreşim nedeni ile meydana gelen yorulma hasarı ve ömrünü tespit etmek için zaman düzleminde ve frekans düzleminde hesaplama yapan yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler sonlu eleman analizleri ile birlikte kullanılarak mekanik tasarımın şekillendirilmesi sürecinde kritik rol oynamaktadır. Bu çalışmada zaman düzleminde yorulma hesaplayan Rainflow yöntemi ve frekans düzleminde yorulma hesaplayan Dirlik yöntemi sonlu elemanlar analizleri yardımı ile incelenmiş ve minimum yorulma ömrünü Dirlik metodunun verdiği görülmüştür. Herhangi bir test ile tasarım doğrulama imkânı bulunmadığında ve tasarım yalnızca sonlu elemanlar yöntemi ile değerlendirileceğinde, Dirlik metodu sonuçları referans alınarak yapılacak tasarımın en güvenli tasarımı vereceği için en avantajlı yöntem olduğu tespit edilmiştir.

## INVESTIGATION OF TIME AND FREQUENCY DOMAIN FATIGUE LIFE CALCULATION METHODS USING FINITE ELEMENT METHOD

Keywords	Abstract
<i>Rainflow Counting, Dirlik Method, Vibration Fatigue, Random Vibrations, Fatigue.</i>	There are several vibration induced fatigue damage and life calculation methods in time domain and frequency domain. These methods with the use of finite element method play important role in mechanical design process. In this study, Rainflow counting method and Dirlik counting method are investigated using finite element method and it is found that Dirlik method gives minimum fatigue life. If there is not an option to validate the design with tests and the only way to evaluate the design is the finite element analysis, Dirlik method is advantageous because it gives the safest design.

### Alıntı / Cite

Demirkaya, Ö.F., Tüfekçi, K., (2020). Zaman ve Frekans Düzleminde Yorulma Ömrü Hesaplama Yöntemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 467-478.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ö.F. Demirkaya, 0000-0002-3278-9646  
K. Tüfekçi, 0000-0001-5358-1396

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	10.01.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	23.04.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	14.05.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

### 1. Giriş (Introduction)

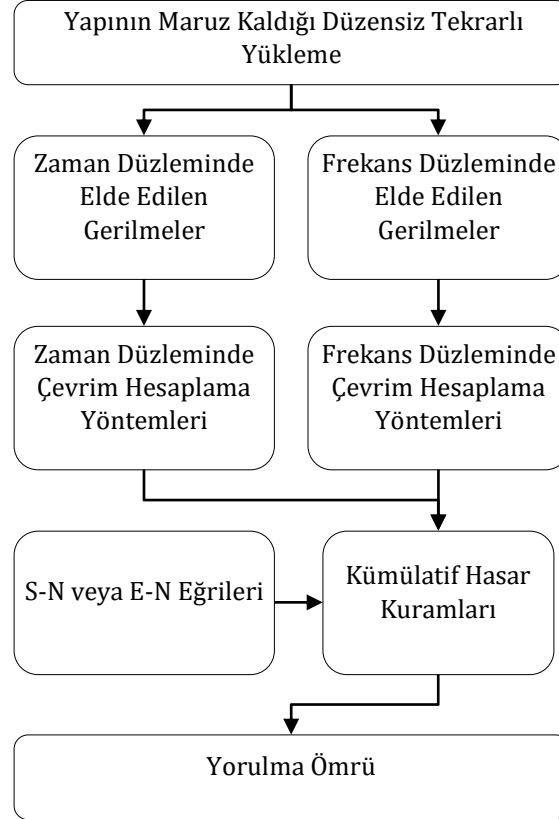
Dinamik yüklere maruz bir yapıda malzemelerin kopma ve zaman zaman akma mukavemetinin altında gerilmelerde kırılması fenomeni 1800'lü yıllarda keşfedilmeye başlanmış ve yorulma ömrü kavramı ortaya çıkmıştır (Anonim, 1996). Kavramın ortaya çıkışından itibaren yapılan araştırmalar neticesinde yapıların yorulma ömrünü hesaplamak üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Yorulma ömrünü hesaplayan öncül yöntemler dönemin elverdiği koşullarda düzenli dinamik yükler altında yapıların davranışını incelerken 1900'lü yıllarda ölçüm ve bilgisayar teknolojilerinin hızla ilerlemesi ile düzensiz dinamik yüklere maruz yapıların yorulma ömrünün incelenmesine olanak sağlayan yöntemler geliştirilmeye başlanmıştır (Cooley ve Tukey, 1965, Piersol 1964, Bendat, 1964).

\* İlgili yazar / Corresponding author: omerfarukdemirkaya92@gmail.com, +90-542-552-7111

Düzensiz dinamik yüklere maruz bir yapının yorulma ömrünü inceleyen yöntemler zaman düzleminde ve frekans düzleminde olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki yöntemde temeli, yapıda oluşan gerilmelerin içerisindeki gerilme aralığı ve çevrim sayılarının çevrim hesaplama yöntemleri ile bulunarak S-N/E-N (Gerilme-Çevrim Oranı/Gerilme-Çevrim Oranı) eğrileri ve kümülatif hasar kuramları yardımı ile yorulma ömrünün hesaplanmasına dayanmaktadır.

Zaman düzleminde yorulma ömrü inceleyen yöntemlerde, yapı üzerinde oluşan gerilmeler doğrudan zaman serisi olarak elde edilip bu veri üzerinden hesaplamalar yapılırken, frekans düzleminde yorulma ömrü inceleyen yöntemlerde oluşan gerilmeler frekans düzleminde güç spektral yoğunlukları cinsinden elde edilip bu veri üzerinden hesaplamalar yapılmaktadır (Şekil 1).



**Şekil 1.** Zaman ve frekans düzleminde yorulma ömrü hesaplama (Fatigue Life Calculation in time and frequency domain)

Günümüzde yaygın olarak zaman düzleminde çevrim hesaplama yöntemi olarak Rainflow metodu, frekans düzleminde çevrim hesaplama yöntemi olarak Dirlik metodu ve kümülatif hasar kuramı olarak Palmgren-Miner kuramı kullanılmaktadır.

Düzensiz dinamik yüklemeye maruz bir yapıda yorulma ömrünün bahsedilen yöntemler ile hesaplanabilmesi için oluşan gerilmelerin servis esnasında yapılan ölçümler veya sonlu elemanlar yöntemi yardımı ile elde edilmesi gerekmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerilmelerin elde edilerek yorulma ömrünün hesaplanması üretim öncesi risklerin belirlenerek gerekli tedbirlerin alınabilmesi için önem arz etmektedir. Sonlu eleman yöntemleri ile dinamik yüke maruz bir yapıda oluşan gerilmeleri zaman düzleminde belirlemek için direkt transient ve modal transient yöntemleri; frekans düzleminde belirlemek için rastlantısal titreşim yöntemi kullanılmaktadır. Transient ve modal transient yöntemlerinde yapının maruz kaldığı dinamik yük analize doğrudan zaman serisi olarak verilir ve çıktı olarak yine zaman serisi olarak gerilmeler elde edilir. Rastlantısal titreşim yönteminde analiz girdisi olarak yapının maruz kaldığı yük güç spektral yoğunluğu cinsinden verilerle yine çıktı olarak güç spektral yoğunluğu cinsinden gerilmeler elde edilir (Şekil 2).



Şekil 2. Dinamik sonlu eleman analizleri (Dynamic finite element analysis)

Bu çalışmada belirlenen bir geometri için sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak zaman ve frekans düzleminde yorumla ömrü hesaplanıp farklı yöntemler için sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Zaman düzleminde yapılan yorulma ömrü hesaplamaları için transient ve modal transient analizleri sonucu elde edilen gerilmeler Rainflow yöntemi ile incelenip, Palmgren-Miner kuramı ve S-N eğrileri kullanılarak ömür hesaplanmıştır. Frekans düzleminde yapılan yorulma ömrü hesaplamaları için rastlantısal titreşim analizi sonucu elde edilen gerilmeler Dirlik yöntemi ile incelenip, Palmgren-Miner kuramı ve S-N eğrileri kullanılarak ömür hesaplanmıştır.

### 1.1. Çevrim Hesaplama Yöntemleri (Cycle Counting Methods)

Zaman veya frekans düzleminde elde edilen gerilmelerin içerisindeki gerilme aralığı ve karşılık gelen çevrim miktarını hesaplayan yöntemlere çevrim hesaplama yöntemleri adı verilir. Çevrim hesaplama yöntemleri sabit gerilme aralığında yapılan yorulma testleri ile elde edilen S-N ve E-N eğrilerinin kullanılarak yorulma ömrü hesaplamasına olanak sağlar.

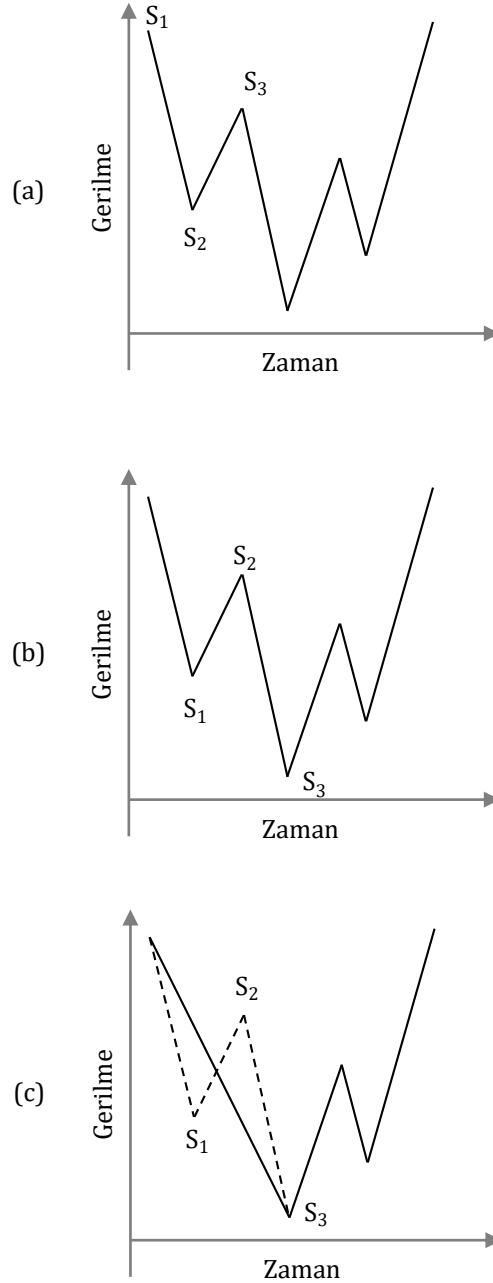
### 1.2. Rainflow Çevrim Hesaplama Yöntemi (Rainflow Cycle Counting Method)

Literatürde zaman düzleminde çevrim hesaplamak için Level-crossing counting, Range-pair counting, Reservoir counting ve Rainflow counting gibi çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Marsh vd., 2016). Rainflow çevrim hesaplama yöntemi Japon bilim insanları Matsuishi ve Endo tarafından geliştirilmiş olup günümüzde en yaygın kullanılan çevrim hesaplama yöntemidir (Matsuishi ve Endo, 1968; Benasciutti vd., 2016).

Rainflow metodunun ortaya çıkmasının ardından üzerine yapılan çalışmalar devam etmiş ve 3 nokta Rainflow çevrim hesaplama, 4 nokta Rainflow çevrim hesaplama gibi çeşitli Rainflow algoritmaları oluşturulmuştur. ASTM E1049-85 (2017)'te çeşitli çevrim hesaplama yöntemi algoritmaları standart hale getirilmiş ve burada üç nokta Rainflow yöntemi standart olarak tanımlanmıştır.

Üç nokta Rainflow çevrim hesaplama yönteminde gerilme verisi yalnızca tepe ve vadilerden oluşacak ve mutlak değeri en büyük tepe veya vadi ile başlayacak şekilde düzenlenir. Başlangıç noktası için en büyük tepeden veya vadiden önceki veri kesilerek verinin sonuna eklenir. Düzenlemenin ardından sıra ile birbiri ardına gelen  $S_1, S_2, S_3$  noktaları için  $\Delta S_1 = |S_1 - S_2|$ ,  $\Delta S_2 = |S_2 - S_3|$  olmak üzere;

1. Eğer  $\Delta S_1 > \Delta S_2$  ise (Şekil 3.a); herhangi çevrim sayılmaz ve  $S_1, S_2, S_3$  kaydırılarak yeni çevrim aranır.
2. Eğer  $\Delta S_1 \leq \Delta S_2$  ise (Şekil 3.b);  $\Delta S_1$  gerilme aralığında bir çevrim sayılır ve  $S_1, S_2$  noktaları veriden çıkartılarak  $S_1$ 'den bir önceki nokta ile  $S_3$  birleştirilir (Şekil 3.c).
3. Yeni oluşan veri baştan başlanarak tekrar işlenir ve tüm veri bitene kadar bu işlem devam eder.



Şekil 3.  $\Delta S_1 > \Delta S_2$ ; çevrim yok (a),  $\Delta S_1 \leq \Delta S_2$ ; çevrim var (b), Çevrim sonrası yeni veri (c). ( $\Delta S_1 > \Delta S_2$ ; no cycle (a),  $\Delta S_1 \leq \Delta S_2$ ; cycle (b), new data after cycle(c).)

### 1.3. Dirlik Çevrim Hesaplama Yöntemi (Dirlik Cycle Counting Method)

Literatürde frekans düzleminde çevrim hesaplamak için Dirlik, Chaudhury&Dover, Wirshicng, Hancock, Steinberg, Tuna, Narrow band gibi çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Al-Bahkali vd., 2014). Dirlik çevrim hesaplama yöntemi testler ile en yakın sonucu veren yöntemdir (Sherratt vd., 2005).

Dirlik yönteminin temeli güç spektral yoğunluğu (PSD) cinsinden verilen gerilmeler için istatistiksel tanımlar kullanarak beklenen çevrim sayısının hesaplanmasına dayanmaktadır.

Dirlik yönteminde T süresi boyunca S gerilme aralığındaki çevrim sayısı  $N(S)$ ;

$$N(S)=E[P] \cdot T \cdot p(S) \quad (1)$$

olarak verilir (Halfpenny, 1999). Burada  $E[P]$ , PSD ile temsil edilen sinyal içerisindeki beklenen tepe noktası sayısı ve  $p(S)$  istatistik yoğunluk fonksiyonu olmak üzere;

$$E[P] = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \quad (2)$$

$$p(S) = \frac{\frac{D_1}{Q} \cdot e^{-\frac{z}{Q}} + \frac{D_2 \cdot z}{R^2} \cdot e^{-\frac{z^2}{R^2}} + D_3 \cdot z \cdot e^{-\frac{z^2}{2}}}{2 \cdot \sqrt{m_0}} \quad (3)$$

$$D_1 = \frac{2 \cdot (x_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2} \quad (4)$$

$$D_2 = \frac{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}{1 - R} \quad (5)$$

$$D_3 = 1 - D_1 - D_2 \quad (6)$$

$$Z = \frac{S}{2 \cdot \sqrt{m_0}} \quad (7)$$

$$Q = \frac{1.25 \cdot (\gamma - D_3 - D_2 \cdot R)}{D_1} \quad (8)$$

$$R = \frac{\gamma - x_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 + D_1^2} \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 \cdot m_4}} \quad (10)$$

$$x_m = \frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \quad (11)$$

olarak verilir (Dirlik, 1985). Burada  $m_0, m_1, m_2, m_3$  ve  $m_4$  frekans düzleminde gerilmeleri veren güç spektral yoğunluğunun alan momentleridir ve;

$$m_i = \int_0^{\infty} \omega_i S(\omega) d\omega \quad (12)$$

ile ifade edilir (Quigley ve Lee, 2012). Burada  $\omega$  frekansı  $S(\omega)$  güç spektral yoğunluğu ifade eder.

#### 1.4. Kümülatif Hasar ve Palmgren-Miner Kuralı (Cumulative Damage and Palmgren-Miner Rule)

Malzemelerin yorulma özelliği olarak verilen S-N eğrileri sabit bir gerilme aralığında malzemenin kırılacağı çevrim miktarını verir. Kümülatif hasar kuramları belirli çevrim sayılarında oluşan farklı gerilme aralıklarının toplam yorulma ömrüne etkisini inceler. İlk kümülatif hasar kuramı Palmgren (Palmgren, 1924) tarafından öne sürülmüş, Miner (Miner, 1945) tarafından matematiksel olarak ifade edilerek günümüzde Palmgren-Miner kümülatif hasar kuramı ortaya çıkmıştır. İlk kümülatif hasar kuramının ortaya çıkmasından bu yana birçok hasar kuramı öne sürülmesine karşın günümüzde halen Palmgren-Miner kuralı yaygın olarak kullanılmaktadır (Fatemi ve Yang, 1997).

Palmgren-Miner kuramı;

$$D = \sum \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (13)$$



olarak ifade edilir. Burada  $n_i$  maruz kalınan  $S_i$  gerilme aralığındaki çevrim sayısını;  $N_{fi}$  S-N eğrisinde  $S_i$  gerilme aralığına karşılık gelen çevrim miktarını ifade eder. Palmgren-Miner kuramına göre  $D=1$  olduğunda hasar meydana gelmektedir.

### 1.5. Sonlu Eleman Yöntemleri (Finite Element Methods)

Sonlu eleman yöntemleri titreşime maruz bir yapıda oluşan gerilmelerin hesaplanması için kullanılır. Zaman düzleminde dinamik sonlu eleman yöntemleri kullanılırken, frekans düzleminde rastlantısal titreşim yöntemi kullanılır.

#### 1.5.1. Zaman Düzleminde Sonlu Eleman Yöntemleri (Finite Element Method in Time Domain)

##### • Direkt Transient Analiz (Direct Transient Analysis)

Lineer dinamik problemler için bir yapının sonlu eleman formülasyonu;

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t)\} \quad (14)$$

ile verilir. Burada  $[M]$  kütle matrisi,  $[C]$  sönüm matrisi,  $[K]$  rijitlik matrisi,  $\{u(t)\}$  nodal deplasman vektörü,  $\{\dot{u}(t)\}$  nodal hız vektörü,  $\{\ddot{u}(t)\}$  nodal ivme vektörü ve  $\{F(t)\}$  kuvvet vektörünü ifade eder.

Direkt transient analiz yönteminde implisit zaman integrasyonu ile elde edilen birbirine bağımlı denklem takımları lineer cebir yöntemleri ile iteratif bir şekilde çözülerek sonuç elde edilir.

##### • Modal Transient Analiz (Modal Transient Analysis)

Eşitlik 14'te görülen  $\{u(t)\}$  ve  $\{F(t)\}$  için,  $\{\phi_i\}$  mod şekil vektörü ve  $y_i$  modal koordinatlar olmak üzere;

$$\{u(t)\} = \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} y_i \quad (15)$$

$$f_i = \{\phi_i\}^T \{F(t)\} \quad (16)$$

tanımları yapılabilir.

Bu tanımlardan yola çıkarak Eşitlik 14;

$$\ddot{y}_i + 2\omega_i \xi_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = f_i \quad (17)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\omega_i$  ve  $\xi_i$  i. mod için frekans ve sönüm katsayısını ifade eder. Eşitlik 17 çözülüp Eşitlik 15 ile tersine dönüşüm yapıldığında  $\{u(t)\}$  elde edilir. Eşitlik 17 birbirinden bağımsız denklemlerden oluşmaktadır ve bu nedenle iteratif bir çözüme gerek duyulmaz. Böylece direkt transient yöntemlerine göre daha hızlı bir çözüm elde edilmiş olur (Horas vd., 2016). Modal transient yönteminin uygulanabilmesi için gerekli mod şekilleri  $\{\phi_i\}$  ve mod frekansları  $\omega_i$  modal analiz yapılarak elde edilir.

#### 1.5.2. Frekans Düzleminde Sonlu Eleman Yöntemi (Finite Element Method in Frequency Domain)

##### • Rastlantısal Titreşim Yöntemi (Random Vibrations Method)

Rastlantısal titreşimler teorisine göre zaman düzlemindeki Gauss dağılımına sahip durağan rastsal bir sinyal güç spektral yoğunluğu ile frekans düzleminde ifade edilebilir. Güç spektral yoğunluğu sinyalin güç içeriğinin frekansa bağlı bir ölçüsüdür ve birimi ifade edilen sinyalin birimine göre  $\frac{\text{Birim}^2}{\text{Hz}}$  ile verilir.

Güç spektral yoğunluğu  $S(\omega)$ , FFT bir sinyalin Fourier Transformu ve  $\Delta\omega$  sinyal çözünürlüğü olmak üzere;

$$S(\omega) = \frac{|FFT|^2}{\Delta\omega} \quad (18)$$

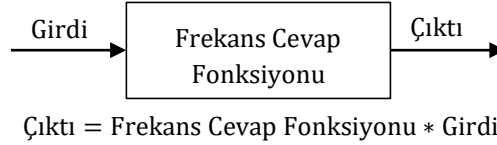
ile elde edilir (Bishop ve Sherratt, 2000).

Güç spektral yoğunluğu sinyalin istatistiksel özelliklerini barındırır, örneğin spektrum altında kalan sinyalin ortalama karekök değerini verir;

$$\text{RMS} = \sqrt{\int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) d\omega} \quad (19)$$

Burada RMS sinyalin ortalama karekök değerini ve  $S(\omega)$  güç spektral yoğunluğunu ifade eder.

Hareket denklemi Eşitlik 14 ile ifade edilebilen tek serbestlik derecesine sahip lineer bir sistem frekans düzleminde için girdi ve çıktı ilişkisi frekans cevap fonksiyonu ile ifade edilebilir (Şekil 4).



**Şekil 4.** Lineer sistemlerde girdi ile çıktı arasındaki ilişki (Input-output relationship of linear systems)

Bir yapının maruz kaldığı titreşim (deplasman, hız, ivme, kuvvet) güç spektral yoğunluğu cinsinden bilindiğinde bu titreşime karşı verilen cevap;

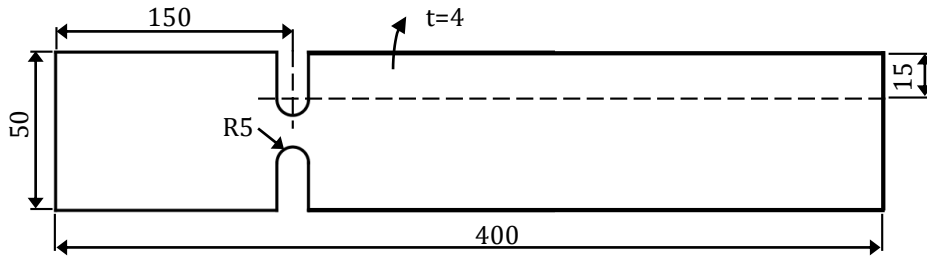
$$S_{yy}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{xx}(\omega) \quad (20)$$

ile ifade edilir (Mršnik vd., 2016). Burada  $S_{yy}(\omega)$  güç spektral yoğunluğu cinsinden çıktı,  $S_{xx}(\omega)$  güç spektral yoğunluğu cinsinden girdiyi ve  $H(\omega)$  frekans cevap fonksiyonunu ifade eder.

Sonlu eleman yönteminde yapının frekans cevap fonksiyonu modal analiz yardımı ile belirlenir ve yapıya güç spektral yoğunluğu cinsinden deplasman, hız veya ivme uygulanarak yine güç spektral yoğunluğu cinsinden gerilmeler elde edilir. Elde edilen bu gerilmeler daha sonra yorulma ömrü hesaplamak üzere frekans düzleminde çevrim hesaplama yöntemlerine girdi oluşturur.

## 2. Materyal ve Yöntem (Materials and Method)

Bu çalışmada Şekil 5'te gösterilen AL6061-T6 malzemeden yapılmış; çentikli kiriş geometrisi için yorulma ömrü zaman düzleminde direkt transient ve modal transient sonlu eleman yöntemleri ve Rainflow çevrim hesaplama yöntemi ile, frekans düzleminde rastlantısal titreşim sonlu eleman yöntemi ve Dirlik çevrim hesaplama yöntemi ile elde edilip sonuçlar kıyaslanarak yöntemlerin avantaj ve dezavantajları incelenmiştir.

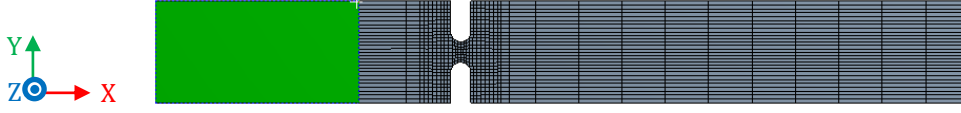


**Şekil 5.** Analizi yapılacak geometrinin ölçüleri (Dimensions of analysis geometry )

### 2.1. Sonlu Eleman Modeli (Finite Element Model)

Sonlu elemanlar analizleri ANSYS yazılımında, yorulma analizleri nCode Designlife yazılımında gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da sonlu elemanlar modeli görülmektedir.

Sonlu eleman modeli lineer katı elemanlar ile hazırlanmıştır. Model 2224 adet eleman ve 3615 düğüm noktasından oluşmaktadır. Çentik bölgesinde 1 mm eleman boyutu kullanılmıştır. Model Şekil 6'da yeşil ile görülen yerden sabitlenmiştir.



Şekil 6. Sonlu elemanlar modeli (The finite element model)

Sonlu eleman analizlerinde AL6061-T6 malzeme için E elastikiyet modülü,  $\rho$  yoğunluk ve  $\nu$  Poisson oranı olmak üzere;

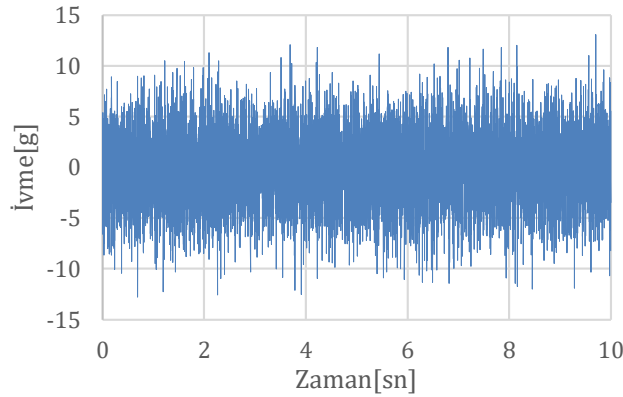
$$\begin{aligned} E &= 71000 \text{ MPa} \\ \rho &= 2.77e^{-6} \text{ kg/mm}^3 \\ \nu &= 0.33 \end{aligned}$$

olarak tanımlanmıştır.

Yorulma ömrü hesabı için kullanılan S-N eğrileri MIL-HDBK-5J (2013)'ye göre oluşturulmuştur.

## 2.2. Zaman ve Frekans Düzleminde İvme Verisi (Acceleration Data in Time and Frequency Domain)

Zaman düzleminde yapılacak olan sonlu eleman analizlerinde uygulanmak üzere oluşturulan beyaz gürültü ivme verisi Şekil 7'de gösterilmiştir. Beyaz gürültü Gauss dağılımında sahip durağan rastlantısal olduğu için rastlantısal titreşim yönteminin kullanılabilmesine olanak sağlar. Oluşturulan ivmenin istatistik verileri **Tablo 1**'de verilmiştir.

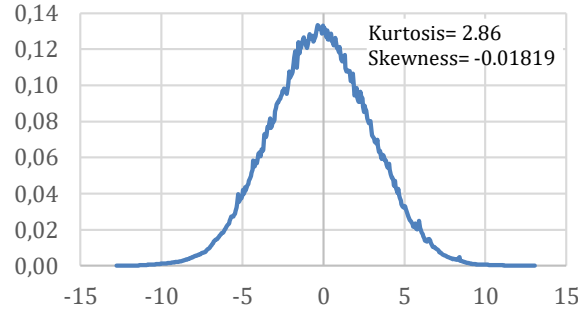


Şekil 7. Sonlu eleman analizlerinde kullanılmak üzere üretilen ivme verisi (Acceleration data used for finite element analyses)

Tablo 1. İvme verisinin istatistikleri (Statistics of acceleration data)

$\bar{g}_{rms}$	Ortalama	Standart Sapma	Maksimum	Minimum
3.839	-0.16771	3.837	13.08	-12.80

Şekil 8'de ivme verisinin olasılık dağılımı görülmektedir. Gauss dağılımına sahip bir veri için Kurtosis 3, Skewness 0'dır (Palmieri ve ark. 2016). Buna göre ivme verisinin normal dağılıma yakın olduğu söylenebilir.



Şekil 8. İvme verisinin olasılık dağılımı (Probability distribution of acceleration data)

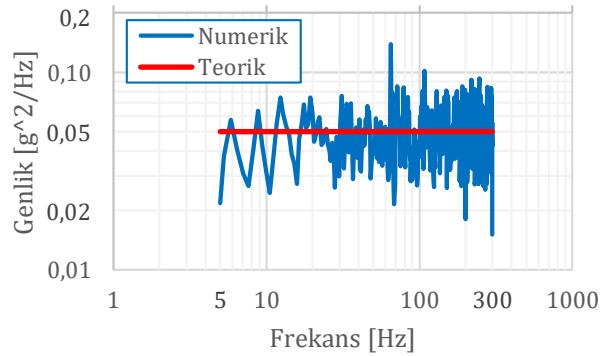
Beyaz gürültüde güç farklı frekanslara eşit şekilde dağıldığı için güç spektral yoğunluğu sabit bir çizgi şeklindedir. Şekil 9'da, Şekil 7'de gösterilen zamana bağlı ivmenin teorik ve numerik olarak hesaplanan güç spektral yoğunluğu verisi gözükmemektedir.

Güç spektrum yoğunluğu altında kalan alanın karekökü temsil edilen verinin RMS değerini verir. Tablo 2'de güç spektral yoğunluğu RMS değerleri verilmiştir.

Tablo 2. Güç spektral yoğunluğu RMS değerleri (RMS values of power spectral densities)

	$g_{rms}$
Numerik	3.832
Teorik	3.840

Zaman düzleminde direkt transient ve modal transient analizleri yapılmıştır. Her iki analizde de girdi olarak zaman düzleminde Şekil 7'de gösterilen ivme verisi z-ekseninde uygulanmıştır.



Şekil 9. İvme verisinin güç spektral yoğunluğu (Power spectral density of acceleration data)

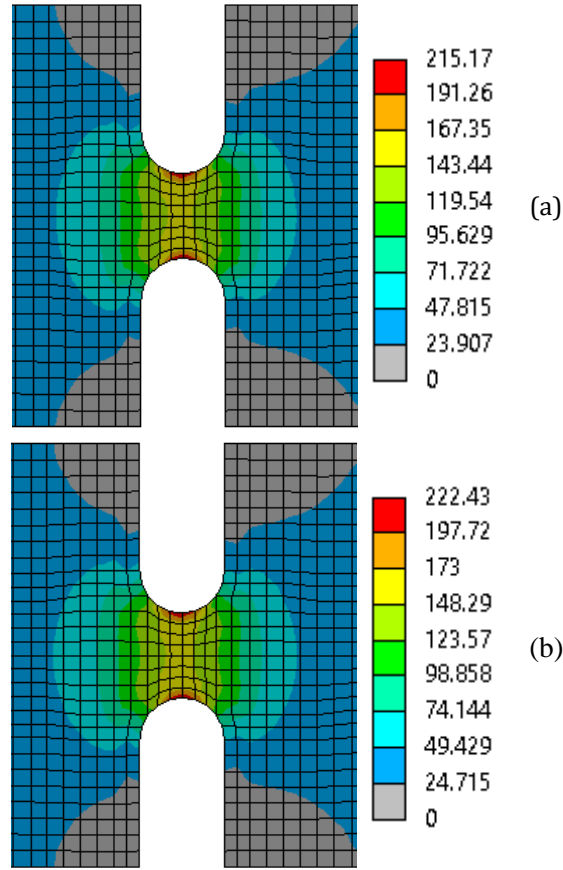
Frekans düzleminde rastlantısal titreşim analizi yapılmıştır. Analizde girdi olarak Şekil 9'da verilen numerik olarak hesaplanmış güç spektral yoğunluğu verisi z-ekseninde uygulanmıştır.

### 3. Bulgular (Results)

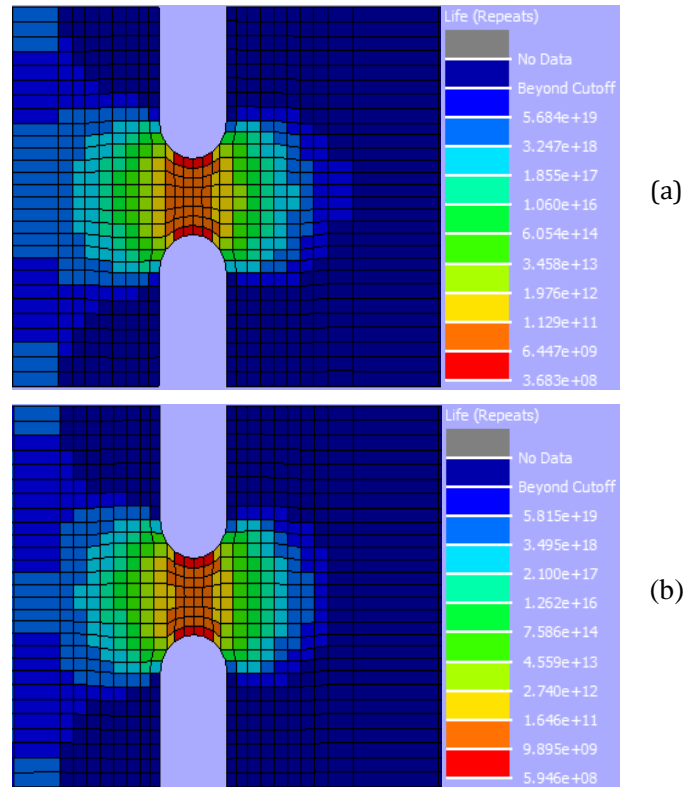
#### 3.1. Zaman Düzleminde Yorulma Ömrü (Fatigue Life in Time Domain)

Şekil 10 (a) ve (b)'de transient ve modal Transient analizleri sonucu çentik bölgesinde 10 sn içerisinde oluşan maksimum eşdeğer gerilmeler görülmektedir. Oluşan gerilmeler incelendiğinde gerilme kontürü benzer görünürken maksimum değerler arasında 7.26 MPa'lık bir fark görülmektedir.

Şekil 11 (a) ve (b)'de transient ve modal transient analizleri sonucu elde edilen gerilmeler kullanılarak Rainflow yöntemi ile yapılan yorulma analizi sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde bulunan ömür arasında  $2.263e^8$  tekrarlık bir fark görülmektedir.



Şekil 10. Zaman düzleminde yapılan analiz sonucu oluşan eşdeğer gerilmeler (MPa). Modal transient analiz (a), Transient analiz (b). (Equivalent stress in time domain (MPa). Modal transient analysis (a), Transient analysis (b))



Şekil 11. Zaman düzleminde yapılan analiz sonucu oluşan yorulma ömrü (Tekrar). Modal transient analiz (a), Transient analiz (b). (Fatigue life in time domain. (Repeats). Modal transient analysis (a), Transient analysis (b))

### 3.2. Frekans Düzleminde Yorulma Ömrü (Fatigue Life in Frequency Domain)

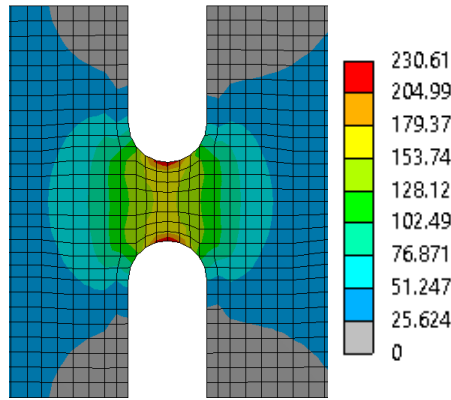
Şekil 12’de rastlantısal titreşim analizi sonucu elde edilen  $3\sigma$  standart sapmada oluşan gerilmeler görülmektedir. Sonuçlar incelendiğin maksimum gerilmenin 230.61 MPa olduğu görülmektedir.

Şekil 13’te rastlantısal titreşim analizi sonucu elde edilen gerilmeler kullanılarak Dirlik yöntemi ile yapılan yorulma analizi sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde minimum yorulma ömrünün  $1.019e^7$  olduğu görülmektedir.

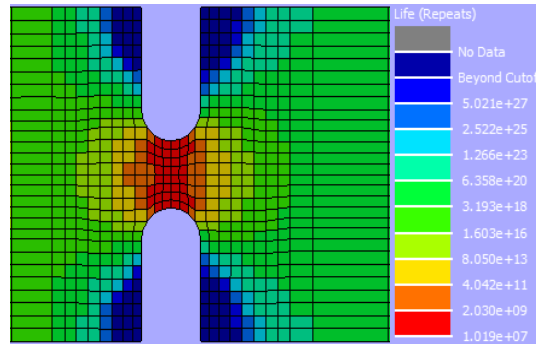
### 4. Tartışma ve Sonuçlar (Discussion and Conclusion)

Tablo 3’de zaman ve frekans düzleminde yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucu elde edilen maksimum gerilmeler, minimum yorulma süreleri, her bir analizin çözüm süresi gösterilmiştir. Buna göre sonlu elemanlar analizleri sonucu oluşan gerilmeler tüm analizler için birbirine yakın gözükürken yorulma ömürleri arasında belirgin farklar gözükmektedir. En düşük yorulma ömrünün Dirlik yöntemi ile elde edildiği görülmektedir. Çözüm süreleri incelendiğinde en uzun çözüm süresinin transient analizde olduğu görülmektedir.

Bu bulgulara göre eğer bir mekanik yapının yorulma ömrü yalnızca sonlu elemanlar analizleri kullanılarak değerlendirilecek ise en güvenli tasarımı oluşturmak için minimum yorulma ömrünü veren Dirlik metodunun kullanılması gerekmektedir. Öte yandan aşırı güvenli tasarımın maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda nihai tasarımın testler ile doğrulanarak oluşturulması önem arz etmektedir.



Şekil 12. Frekans düzleminde yapılan analiz sonucu oluşan eşdeğer gerilmeler (MPa) (Equivalent stress in frequency domain (MPa))



Şekil 13. Frekans düzleminde yapılan analiz sonucu oluşan yorulma ömrü (Tekrar). (Fatigue life in frequency domain (Repeats))

**Tablo 3.** Yapılan analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of results)

	Maksimum Eşdeğer Gerilme(MPa)	Minimum Yorulma Ömrü(Tekrar)	Çözüm Süresi (Dakika)
Modal Transient analiz ve Rainflow yöntemi	215.17	3.683e <sup>8</sup>	2.9
Transient analiz ve Rainflow yöntemi	222.43	5.946e <sup>8</sup>	65
Rastlantısal Titreşim analizi ve Dirlik yöntemi	230.61	1.019e <sup>7</sup>	0.2

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

### Kaynaklar (References)

- Al-Bahkali, E., Elkenani, H., Souli, M., 2014. Fatigue life estimate of landing Gear's leg using modal analysis, *International Journal of Multiphysics*, 8 (2), 231-244.
- Anonim, 1996. *ASM Handbook Fatigue and Fracture Volume 19*, ASM International, U.S.
- ASTM E1049-85, 2017. *Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Benasciutti, D., Sherratt, F., Cristofori, A., 2016. Recent developments in frequency domain multi-axial fatigue analysis, *International Journal of Fatigue*, 91 (2), 397-413.
- Bendat, J.S., 1964. *Probability Functions for Random Responses: Prediction of Peaks, Fatigue Damage, and Catastrophic Failures*. NASA Contractor Report, U.S.
- Bishop, N., Sherratt, F., 2000. *Finite Element Based Fatigue Calculations*, NAFEMS, U.K.
- Cooley, J. W., Tukey, J.W, 1965. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series, *Mathematics of Computation*, 19 (90), 297-301.
- Dirlik, T., 1985. *Application of computers to fatigue analysis*, Doktora Tezi, University of Warwick.
- Fatemi, A., Yang, L., 1998. Cumulative fatigue damage theories: a survey of state of the art for homogenous materials, *International Journal of Fatigue*, 20 (1), 9-34.
- Halfpenny, A., 1999. *Key Engineering Materials*, 167, 401-410.
- Horas, C.S., Correia, J.A.F.O., De Jesus, A.M.P., Calçada, R., Aenlle, M.L., Kripakaran, P., Pelayo, F., Fenandez-Canteli, A., 2016. Application of modal superposition technique in the fatigue analysis using local approaches, *Procedia Engineering*, 160, 45-52.
- Marsh G., Wignall, Thies P.R., Barltrop N., Incecik A., Venugopal V., Johanning., 2016. Review and application of Rainflow residue processing techniques for accurate fatigue damage estimation, *International Journal of Fatigue*, 82 (3), 757-765.
- Matsuishi M., Endo T., 1968. Fatigue of metals subject to varying stress, *Proc. Kyushu Branch of Japan Society of Mechanical Engineers*, 37-40.
- MIL-HDBK-5J, 2003. *Metallic Materials And Elements for Aerospace Vehicle Structures*, Department of Defense Handbook, U.S.
- Miner, M.A., 1945. Cumulative damage in fatigue, *Journal of Applied Mechanics*, 12, 159-164.
- Mršnik, M., Slavič, J., Boltežar, M., 2016. Frequency-domain methods for a vibration-fatigue-life estimation – Application to real data, *International Journal of Fatigue*, 47, 8-17.
- Palmgren, A., 1924. Die lebensdauer von kugellagern, *VDI-Zeitschrift*, 68, 339-341.
- Palmieri, M., Česnik, M., Cianetti, F., Slavič., J Boltežar, M., 2017. Non-Gaussianity and non-stationarity in vibration fatigue, *International Journal of Fatigue*, 97, 9-19.
- Piersol, G. A., 1964. *The Measurement and Interpretation of Ordinary Power Spectra for Vibration Problems*, NASA Contractor Report, U.S.
- Quigley, J., Lee, Y., 2012. Assessing Dirlik's Fatigue Damage Estimation Method for Automotive Applications, *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*, 5(2), 911-920.
- Sherratt, F., Bishop, N.W.M., Dirlik T., 2005. Predicting fatigue life from frequency domain data, *Engineering Integrity*, 8, 12-16.



## ÇİMENTOLU MACUN DOLGUDA C SINIFI UÇUCU KÜLÜN ÇİMENTO YERİNE İKAMESİNİN DAYANIMA OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Serkan TÜYLÜ\*

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Pb-Zn Atıkları,</i> <i>Çimentolu Macun Dolgu (ÇMD),</i> <i>Uçucu Kül,</i> <i>Dayanım.</i>	<p>Çimentolu macun dolgu (ÇMD) yöntemi, öncelikle yüksek miktarda proses atıklarının yeraltında depolanabilmesine imkan vermesinin yanında tavan yüklerine bağlı göçüklere karşı da destek sağlayan önemli bir atık yönetimi sistemidir. Dolayısıyla bu sistem içerisinde oluşturulan macun malzemenin zamana bağlı olarak alacağı maksimum dayanım değeri önem kazanmaktadır. İstenilen dayanımın sağlanabilmesi için, macun malzemenin optimum karışım oranlarının en az maliyetle belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, macun dolgudaki yüksek maliyetlerden birini oluşturan çimento miktarını düşürmek için Tufanbeyli uçucu külünün çimento yerine ikame edilebileceği yaklaşık katkı oranının belirlenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle çökme deneylerine göre macun malzemedeki katı içeriği %80 olarak belirlenmiş ve buna göre ÇMD referans numuneleri hazırlanmıştır. %80 katı içeriği sabit tutularak %3-11 arası çimento kullanımı gerçekleştirilmiş, bunlardan %9 ve %11 çimento içerikli numunelerin dayanımlarının yeterli dayanım değerleri verdiği tespit edilmiştir. Daha sonra bu çimento oranlarının da %20-30-40 ve 50'si oranında çimento yerine uçucu kül ikameli numuneler hazırlanmış ve 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine göre de macun dolgu malzemesinin dayanımına etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, referans numunelere göre %9 çimentonun %30'una kadar uçucu kül ikamesinin özellikle 56 ve 90 günlük kür sürelerinde ve %11 çimentonun %50'sine kadar uçucu kül ikameli karışımların ÇMD karışımında kullanılabileceği ortaya konulmuştur.</p>

## INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CLASS C FLY ASH CEMENT SUBSTITUTION ON STRENGTH IN CEMENTED PASTE BACKFILL

Keywords	Abstract
<i>Pb-Zn Tailings,</i> <i>Cemented Paste Backfill (CPB),</i> <i>Fly Ash,</i> <i>Strength.</i>	<p>Cemented Paste Backfill (CPB) Method is an important tailings management system that can provide support against collapses due to the roof loads, as well as enabling storage possibilities of high amount of process tailings at the underground. Therefore, it gains important that the paste material created in this system gets the maximum strength value depending on the time. For this purpose, the optimum mixing ratios of the paste material should be determined with minimum costs. The main purpose of this study is to determine the additive rate that it can substitute for cement in order to reduce the amount of cement, which constitutes one of the high costs of paste backfill. Firstly, the solid content of the paste material was determined as 80% according to the slump tests, and then CPB reference samples were prepared. By taking the solid content of 80% fixed, 3-11% cement was used, it was determined that the strength of the samples containing 9% and 11% cement gave sufficient strength values. Subsequently, 20-30-40 and 50% of these cement ratios were substituted with fly ash samples and their effects on the strength of CPB were examined over the curing times of 28, 56 and 90 days. As a result, it put forth that, according to reference samples, fly ash substitution of up to 30% can use in the paste mixtures with 9% cement ratio, especially in curing periods of 56 and 90 days. In addition, up to 50% fly ash substitution can use instead of cement in 11% cement.</p>

### Alıntı / Cite

Tüylü, S., (2020). Çimentolu Macun Dolguda C Sınıfı Uçucu Külün Çimento Yerine İkamesinin Dayanım Olan Etkilerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 479-488.

\* İlgili yazar / Corresponding author: stuyulu@istanbul.edu.tr, +90-212-473-7070



Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
S. Tüylü, 0000-0002-8128-9840	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	27.01.2020
	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	28.04.2020
	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	03.05.2020
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda maden atıklarının yerüstünde aşırı depolanması nedeniyle özellikle atık barajı kazalarının sonucu olarak çok sayıda insan ve canlı yaşamının kaybedildiği, bununla beraber yaşam kaynağı olan yeraltı ve yerüstü sularının kirlendiği çevresel felaketler yaşanmıştır. Bu problemlerin çözümüne yönelik olarak, yerüstünde depolanan atıkların hacminde bir azalma sağlaması amacıyla özellikle yeraltı madenciliğinde bu atıkların çimentolu macun dolgu (ÇMD) malzemesi olarak kullanımında büyük bir artış görülmektedir. Madencilik endüstrisinde çimentolu macun dolgu sistemi, atıkların yeraltında depolanabilmesinin yanı sıra tavan yüklerine bağlı göçüklere karşı da destek görevini üstlenmektedir. Dolayısıyla oluşturulan macun malzemenin zamana bağlı olarak alacağı maksimum dayanım değeri önem kazanmaktadır. Oluşturulan ÇMD karışımları tavan tahkimatı içinse 28 günlük kür süresine göre minimum  $\geq 4$  MPa, eğer sadece yüksüz dolgu içinse  $\geq 1$  MPa dayanım şartını sağlamalıdır (Hassani ve Archibald 1998; Li vd., 2002; Fall vd., 2005; Belem ve Benzaazoua, 2008; Li ve Fall, 2016).

Yeraltında oluşturulan boşluklara doldurulan bu macun malzeme, genellikle tesis atığının çimento ile karışımından oluşmakta ve katı içeriği %70-85 arasında değişmektedir (Yılmaz vd., 2011; Wu vd., 2015; Li ve Fall, 2016; Jiang vd., 2017). Katı oranındaki değişkenlik macun dolgu malzemesinin pompalanabilirliği için önemlidir ve bu nedenle 15–25 cm çökme (slump) aralığına uygun bir katı oranı seçilmektedir (Belem ve Benzaazoua, 2008; Cihangir vd., 2015; Ouattara vd., 2017). Bu durum, taşımada basınç kayıplarını azaltır ve kazanılan dayanımı artırır. Ayrıca belirli bir çökme değerindeki macunun su içeriği ve yoğunluğu ince tane miktarına göre değişmektedir. Tane boyutu incelidikçe ıslanan yüzey alanı artacağından nem içeriği yüksek ve yoğunluğu düşük kalacaktır (Newman vd., 2001; Meggyes ve Debreczeni, 2006).

Macun dolgu uygulamalarında istenilen dayanıma bağlı olarak kullanılan çimento miktarı %3-10 arasında değişebilmektedir (Benzaazoua vd., 2002; Huang vd., 2011; Wu vd., 2015; Li ve Fall, 2016; Koohestani vd., 2017; Wang vd., 2017; Ouattara vd., 2018). Bununla beraber bazı stoplarda, ilk birkaç metreye kadar yapılan ilk dolgu (plug-fill) ve yaklaşık 1 hafta sonra da ikinci dolgu (residual-fill) olmak üzere iki kademeli macun dolgu çalışmaları da yapılmaktadır. İlk dolgu çimento içeriği %5-7 arasında değişmekte iken ikinci dolgu çimento içeriği %2-5 arasında değişmektedir (Yılmaz vd., 2015). Bu bağlayıcı oranlarındaki farklılıkların temelinde macun dolguda istenen dayanım değerleri ile karışım bileşenlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri de önemli rol oynamaktadır. Dolgu bileşenlerinden her biri, macun dolgunun kısa, orta ve uzun dönemdeki duraylılığını etkilemektedir. Özellikle çimento miktarı arttıkça macun dolgunun dayanımının artması beklenmektedir. Ancak atık içerisindeki sülfür oranına bağlı sülfat atıklar karşısında, kalsiyumca zengin çimento gibi bağlayıcılar dayanım etkisini farklı oranlarda etkileyebilirler (Dong vd., 2019).

Macun dolgu karışımında kullanılan bağlayıcılar önemli ölçüde maliyeti etkilemektedir. Yalnızca macun dolgu maliyetleri, toplam maden işletme maliyetlerinin % 10'u ila % 20'si arasındayken, bağlayıcılar ise dolgu maliyetlerinin % 75'ini oluşturabilmektedir (Belem ve Benzaazoua, 2008). Literatürde hem bağlayıcı maliyetlerini azaltmak hem de sülfat atağa karşı daha duraylı macun dolgu üretmek amacıyla karışıma uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddeleri ilave edilerek yapılmış çalışmalar mevcuttur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde; özellikle sülfür içeren minerallerin bulunduğu atıkların kullanıldığı çimentolu macun dolgu karışımlarında uygun bir endüstriyel tasarımın henüz ortaya konulmadığı görülmüştür. Bu durumun temel sebebi, macun dolgu karışımında kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin macun dolgu karışım oranlarını doğrudan etkilemesidir. Dolayısıyla, bu çalışmada elde edilen laboratuvar sonuçları doğrultusunda bir Pb-Zn yeraltı madeni için endüstriyel uygulama sırasında kullanılacak CaO bakımından zengin C sınıfı uçucu kül ikameli en uygun ÇMD karışım oranlarının yaklaşık olarak belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, bir Pb-Zn yeraltı maden işletmesinde %80 katı içeriğinde ve %3-11 arasında çimento bağlayıcısı uygulanarak ÇMD numuneleri oluşturulmuştur. 28-56 ve 90 günlük kür sürelerine göre dayanım açısından tahkimat amaçlı kullanılacak macun dolgu çimento oranları belirlenmiştir. Bu çimento oranları temel alınarak, çimento yerine %20-30-40-50 oranlarında uçucu kül kullanımının macun dolgunun dayanımına etkisi araştırılmıştır. Böylece uçucu külün bir Pb-Zn yeraltı madeninde macun dolgu uygulamasında çimento yerine ikame edilerek çimento miktarının azaltılabileceği ortaya konulmuştur. Ayrıca yerüstünde depolanan atıkların azaltılmasıyla çevresel açıdan oluşturabileceği ciddi riskler daha da kontrol edilebilir olacaktır. Bu çalışmayla sürdürülebilir madencilığe katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

ÇMD uygulamalarında kullanılan temel bağlayıcı malzeme genellikle portland çimentosudur (PÇ). Aynı zamanda çimento, ÇMD işletme maliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle işletme maliyetlerini minimumda tutmak için çimento oranı azaltılırken istenilen dayanım ve duraylılığı sağlamak amacıyla yapay veya doğal puzolanların ikincil bağlayıcı olması ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Örneğin; Benzaazoua vd. (1999), ~%17 sülfür içeriği olan bir bakır madeni atığını ağırlıkça %4,5'i kadar bağlayıcı (%40'ı uçucu kül ve %60'ı PÇ ) ile karıştırarak ÇMD numuneleri hazırlamışlardır. Sonuç olarak sülfat atağına dirençli uçucu kül kullanımının genellikle ÇMD dayanımının azalmasını engellediğini ifade etmişlerdir. Benzaazoua vd. (2002), ÇMD karışımlarında %3, %4,5 ve %6 bağlayıcı oranlarında %50 PÇ ve %50 uçucu külü 3 farklı atık türünde kullanmışlardır. Bu atıklar, %32 sülfür içeren A1 atığı, %16 sülfür içeren B atığı ve %5 sülfür içeren C atığıdır. 90 günlük kür sürelerine göre; %3 ve %4,5 bağlayıcı oranına göre en yüksek dayanım sırasıyla ~300 kPa ve ~700 kPa ile B atığı, %6 bağlayıcı oranına göre en yüksek dayanım ~1100 kPa ile A1 atığı ölçülmüştür. Kesimal vd. (2004), bir bakır madenin ~%4 sülfür içeren atıkları ve portland kompoze çimento 32,5 R tipi ile ÇMD örnekleri oluşturmuşlardır. Yüksek sülfür taşıyan atıklarda, bağlayıcının, macun dolgu işlemleri için yeterli uzun vadeli dayanımı sağlamak için etkili veya uygun olmadığı bulunmuştur. Ramlochan vd. (2004), düşük dereceli kireç içeren uçucu külün yüksek oranlarda bağlayıcı ile birlikte macun dolgu karışımlarında kullanılmasının uygun olmadığını ifade etmişlerdir. Hassani vd. (2007), yüksek sülfür içeren atıklardan oluşmuş ÇMD karışımlarının uzun dönemdeki duraylılığının sağlanabilmesi için yalnız başına portland çimentosunun yeterli olamayacağını, çimento yerine %50 C sınıfı uçucu kül ikame ÇMD numunelerinin daha iyi dayanım sonuçları verdiğini belirtmişlerdir. Erçikdi vd. (2009), PÇ'ye ikame olarak kullanılan uçucu külün, ÇMD örneklerinin uzun süreli performansını iyileştirdiğini ve bağlayıcı maliyetlerini düşürmek için mineral katkı maddeleri olarak uygun bir şekilde kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Tariq ve Yanful (2013), uçucu kül gibi puzolanik malzemelerin, puzolanik reaksiyonlar yoluyla PÇ'nin hidratasyonu sırasında serbest bırakılan Ca(OH)<sub>2</sub> tüketimine katkı sağladığını ve bununla beraber sülfat atağıyla oluşan bozulmanın, çimentodaki mono sülfat hidrat (AFm) ve kalsiyum alüminat hidrat ile sınırlandırılarak veya ortadan kaldırılarak kontrol edilebildiğini anlatmışlardır. Gorakhki ve Bareither (2018), Amerika'daki üç ayrı maden (bakır, soda külü ve lal taşı) atıkları, çimento yerine ikame edilen üç spesifik olmayan uçucu kül ve PÇ (Tip I – II) karışımları ile beraber katı içeriği % 60-75 (su içeriği =% 33-67), su-bağlayıcı oranı 2.5 ve 5 olan ÇMD numuneleri hazırlamışlardır. 0,1 gün (2 saat), 7 ve 28 gün kürledikten sonra tek eksenli basma dayanımı sonuçlarına göre kırılma stresi, CaO içeriğinde ve uçucu külün CaO-SiO<sub>2</sub> oranındaki artışla doğru orantılı olarak artmıştır. Dolayısıyla, bu durum parçacıklar arasında daha etkili bir bağlanma olduğunu ortaya koymuştur. Yılmaz (2018), bünyesinde ~%51 SO<sub>3</sub> barındıran atıklarla %75,7-76,9 katı içeriğinde, %3, %4,5 ve %7 bağlayıcı ile (%40'ı C tipi uçucu kül - %60'ı PÇ ve %80'i cüruf - %20'si PÇ) ÇMD numuneleri hazırlamıştır. Derinlik etkisine ve 28 günlük kür süresine göre cüruf esaslı çimentolu ÇMD numunelerinin, içerdiği katkı miktarı ve kimyasal bileşimi nedeniyle hem uçucu kül esaslı çimentodan hem de sadece Portland çimentolu ÇMD numunelerinden daha iyi dayanım verdiğini ifade etmiştir. Eker (2019), ~%33 sülfür içeren bir bakır madeni atığı ile ÇMD örnekleri oluşturmuştur. Bağlayıcı olarak kullanılan % 3- 11 çimento miktarlarının % 10, 20, 30 ve 40'ı kadar ikame edilen F tipi uçucu külün bütün çimento oranlarındaki karışımlarda basınç dayanımını arttırdığını belirlemiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde; yüksek oranda sülfat ya da ağırlıklı pirit minerali içeren atıkların kullanıldığı farklı katı içeriklerinde ve farklı bağlayıcı oranlarında hazırlanan ÇMD karışımlarında, özellikle sülfat atak karşısında dayanımın olumsuz etkilenmemesi için çimento ikamesi olarak farklı tür ve oranlarda uçucu külün kullanıldığı anlaşılmaktadır. Bu durumun en önemli nedenlerinden biri de ÇMD karışımında kullanılan bağlayıcıların, madene göre fiziksel ve kimyasal özellikleri farklılıklar gösteren atıklarla nasıl bir tepkime vereceğinin tam olarak bilinmemesidir. Farklı bölgelerdeki farklı termik santrallerde ortaya çıkan aynı sınıf uçucu küldeki farklı CaO-SiO<sub>2</sub> oranları ÇMD dayanımını doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan, özellikle sülfür içeren bir atıkla en uygun ÇMD dayanımının belirlenebilmesi için sülfata dirençli bağlayıcılar kullanılarak alternatif ÇMD karışımlarının ortaya koyulmasına ve macun dolgu mukavemeti performansının artırılması için ilave testler yapılarak araştırılmasına gereklilik olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, yapılan çalışmada bir Pb-Zn atığı ile farklı oranlardaki C sınıfı uçucu kül karıştırılarak hazırlanan ÇMD numunelerinin dayanımları araştırılmış, bu konudaki literatüre ve endüstriye katkıda bulunulmuştur.

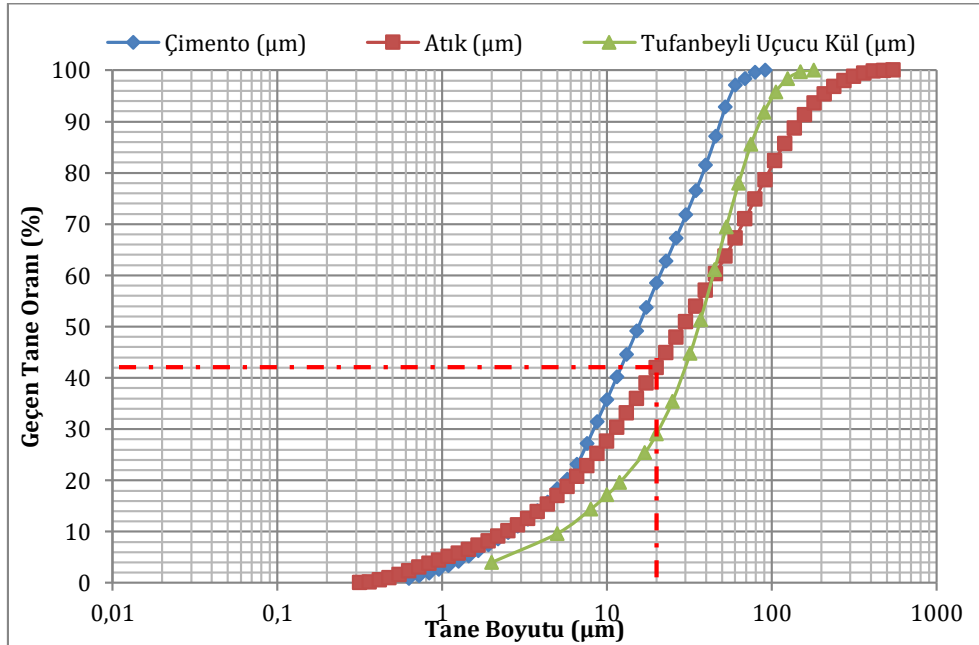
## 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Macun dolgu karışımları hazırlanırken, Balıkesir/Balya bölgesinden alınmış Pb-Zn madeni proses atığı, Adana Tufanbeyli Termik Santrali'nden alınmış uçucu kül, CEM I 42,5 R Portland Çimentosu ve şebeke suyu kullanılmıştır. Dolgu karışımında kullanılan malzemelerin tane boyut dağılımları lazer partikül boyut analiz cihazı ile belirlenmiş ve Şekil 1'de verilmiştir. Ayrıca bu malzemelerin bazı kimyasal özellikleri ICP-MS analizi ile belirlenmiş ve Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Atık, çimento ve uçucu külün önemli kimyasal bileşenleri (Important chemical components of tailings, cement and fly ash)

Bileşenler	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	*S/**SO <sub>3</sub>
Atık (~%)	13,6	36,2	8,1	23,3	2,5	2,6	0,2	*7,5
Uçucu Kül (~%)	4,5	33,7	19,8	22	2,2	1,6	0,5	**13,7
Çimento (~%)	3,4	19,9	4,8	61,6	1,3	0,9	0,3	**3,7

Tüylü (2016) bir çalışmasında, Pb-Zn atıkları ile yapmış olduğu XRD analizine göre, öncelikli olarak kalsit (CaCO<sub>3</sub>) ve kuvars (SiO<sub>2</sub>) daha sonra ise sırasıyla feldspat grubu mineralleri (albite Na(AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)), pirit (FeS<sub>2</sub>), kil grubu mineraller ve mika grubu minerallerin atığın içerisinde yer aldıklarını belirlemiştir. Tablo 1'deki sonuçlara göre atık malzeme içerisinde söz konusu minerallerle beraber en fazla %36 değeri ile kuvars minerali bulunmaktadır. CaO ise, cevher zonunun yan kayacının kireçtaşı olması ve flotasyon işleminde şist ve piritin çöktürülmesinde ve pülün pH değerini ayarlama kireç kullanılması nedeniyle %23 değeri ile katı atığın içerdiği en yüksek değerlerden biri olarak gözükmektedir. Demirin ağırlıklı olarak piritten, alüminyumun albitten geldiği ifade edilebilmektedir. Ayrıca %7,5 S değeri ile atık numunelerinin asit potansiyeli (AP) Modifiye ABA yöntemi kullanılarak 234,0625 kg CaCO<sub>3</sub>/t belirlenmiştir. Ayrıca, mineralojik ve kimyasal analiz sonuçlarına göre, numunedeki nötralizasyon potansiyeli (NP)'nin kaynağının Ca ve Mg içeren mineraller olduğu düşünülmektedir. Bu kapsamda NP, her iki mineralin yüzdeleri kullanılmak suretiyle yaklaşık 0,9921 olarak hesaplanmıştır. Net nötralizasyon potansiyeli (NNP) değerinin NP/AP = < 1 ve NP-AP = < -20 kg/t CaCO<sub>3</sub> olduğu hesaplanmış ve atık malzemenin bu sonuçlara göre asit üretebileceği belirlenmiştir. Diğer bir macun dolgu karışım malzemesi olan uçucu kül ise, ASTM C618'de istenen SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≥ %50 şartına göre toplamda %58 değeri ile kimyasal bileşimlerine bağlı olarak C sınıfına girmektedir. C sınıfı uçucu kül, yüksek kalsiyum içeriğinden dolayı maden atıklarının asit potansiyeline karşı koyabilmektedir (Eker, 2019). Ayrıca yapılarında %1-3 arasında değişen serbest kireç bulunur ve bu nedenle kendi kendine çimentolaşma özelliğine sahiptir (Alkaya, 2009). Tufanbeyli uçucu külünün bu çalışmada tercih edilme nedenlerinden birisi de, C sınıfı ve CaO-SiO<sub>2</sub> oranının yüksek olmasıdır.

**Şekil 1.** Atık, çimento ve uçucu külün tane boyut dağılımları (Particle size distributions of tailings, cement and fly ash)

Macun dolgunun pompalanabilmesindeki önemli parametrelerden biri atık malzemesinin sahip olduğu 20 µm altındaki malzemenin oranıdır (Brackebusch, 1994). Adiguzel ve Bascetin (2019) ise bir çalışmalarında macunun pompalanabilmesi için, karışımın atık malzemesinin 38 µm elek altı içeriğinin %20 olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Şekil 1'e göre karışımında kullanılan atık malzemesinin 20 µm tane boyutundan geçen oranı %42'dir. Fall vd. (2005) çalışmalarında macun dolgudaki <20 µm ince tane oranının %40 ve %55 aralığına kadar numunenin dayanımını değiştirmedeğini ifade etmişlerdir. Ayrıca Fall vd. (2008) bir başka çalışmalarında atık içerisinde %25'lik ince tane oranında, ÇMD içindeki makro gözeneklerin (1-10 µm) oranının önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, atık malzeme içerisinde ince tane oranının artmasının karışımın su tutma kapasitesini arttırdığını ve dolgunun dayanımını olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Bununla beraber dayanımı etkileyen en önemli malzeme olan çimentonun 90 µm'dan büyük tane boyutunun ağırlıkça %14'ten az olması gerektiği ilgili standartta belirtilmiştir (TS EN 196-6). Hidratasyon olayı sonunda, yüksek dayanımlar elde edilmesi

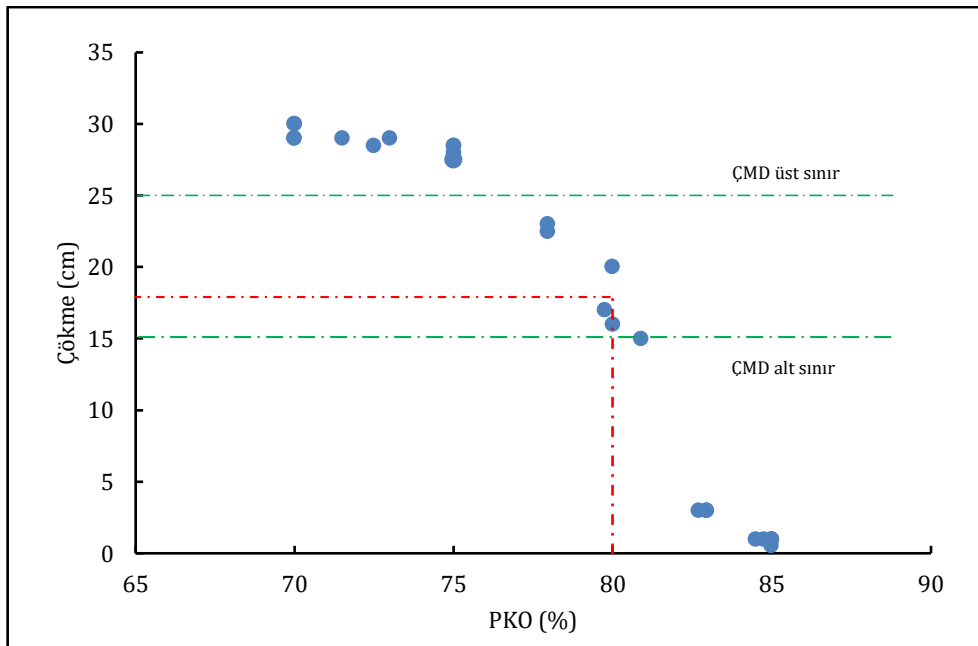
çimento tanelerinin aktif olmalarına bağlıdır ve aktiflik çimentonun ince öğütülmesiyle gerçekleşmektedir. Dolayısıyla çimento yerine ikame edilecek uçucu külün boyutu için de aynı şartlar geçerli olmaktadır. Uçucu külün tane boyutu genelde 0,5µm - 150µm arasında değişmektedir. Hem camsı küresel, hem de düzensiz şekilli taneler bulunmaktadır. Bu tanelerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün tipinden (düşük veya yüksek CaO) kaynaklanmaktadır. Yüksek CaO küllerde, mikroyapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı vardır. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük CaO'lu küller kadar düzgün değildir (TÇMB, 2009).

Bu çalışmada öncelikli olarak %70-85 aralığında katı içeriğindeki malzemeye çökme testi (ASTM C143) yapılarak ÇMD için en uygun katı içeriği belirlenmiştir. Ardından katı malzemenin ağırlıkça %3, 5, 7, 9 ve 11 oranlarında çimento karıştırılarak ÇMD referans numuneleri oluşturulmuştur. ÇMD'de genel olarak karışım suyu için tesis suyu veya musluk suyu kullanılmaktadır (Fall vd., 2009; Hefni, 2014). Bu çalışmada ise, macun dolgu karışımının istenen akışkanlığa gelmesi için şebeke suyu kullanılmıştır. Karışımın (atık malzeme, bağlayıcı ve su) homojen bir şekilde hazırlanması için beton mikseri kullanılmıştır. Ghirian ve Fall (2015) çalışmasındaki gibi karıştırma işlemi 7 dakika süreyle yapılmıştır. Hazırlanan macun dolgu karışımı 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki silindir numune kalıplarına dökülmüştür. Bu referans numunelerine 28, 56, 90 ve 200 günlük kür (80% nem, 22 °C) sürelerinin sonunda ASTM C39'a göre Tek Eksenli Basma Dayanımı (TEBD) testi yapılmıştır. Her bir karışımın en az 5 adet numune kırılmış ve aritmetik ortalaması alınmıştır. Oluşturulan macun dolgu karışımının tavan tahkimatı sağlaması amacıyla istenilen minimum 4 MPa'lık dayanım değeri dikkate alınmış ve bu dayanım değerlerini sağlayan çimento oranları belirlenmiştir. Belirlenen çimento oranlarındaki karışımlara, çimentonun %20, 30, 40 ve 50'si oranlarında çimento yerine uçucu kül katılmıştır. Referans numunelerdeki gibi aynı kür koşulları altında 28, 56 ve 90 günlük sürelerle göre TEBD testi yapılmıştır. Özellikle referans numunelerdeki %9 ve %11 çimento katkılı macun malzemelerin 200 ve 90 günlük dayanım sonuçları birbirlerine çok yakın olduğu için, uçucu kül ikameli numunelerde en fazla 90 günlük kür süresine bakılmıştır.

#### 4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

##### 4.1. Uygun Katı Malzeme ve Çimento Oranının Belirlenmesi (Determination of Optimum Solid Content and Cement Ratio)

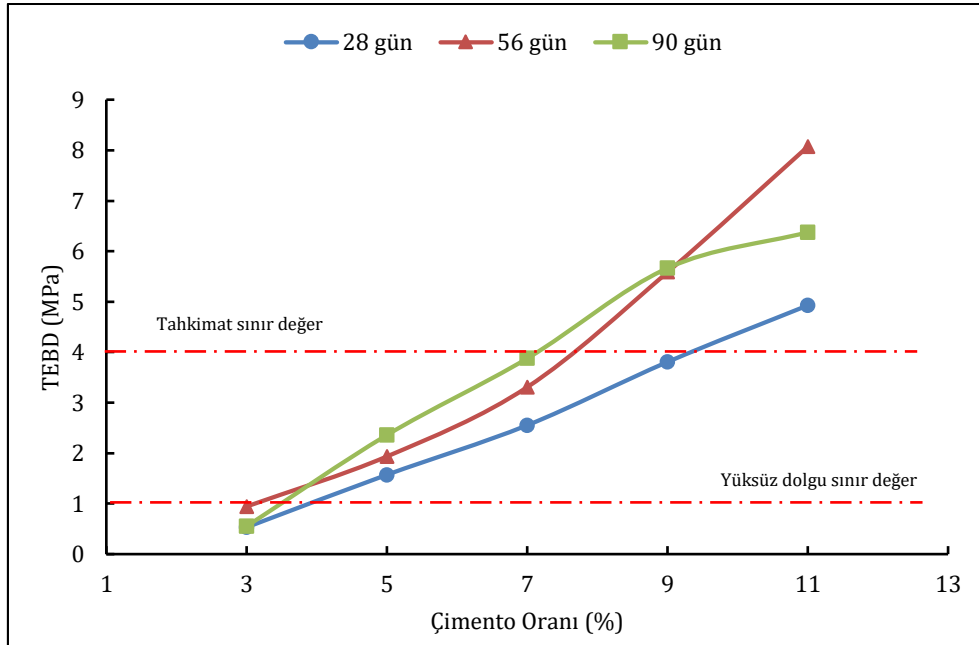
Macun dolgu malzemesinin stopa transferi ve yerleşmesindeki akışkanlığı çok önemlidir. Bu durumu, macunun karışımında kullanılan katı malzeme oranını doğrudan etkilemektedir. Katı malzeme ya da pülpde katı oranını (PKO) belirlemek için ÇMD yönteminde genellikle çökme (slump) deneyi yapılmakta ve ideal akışkanlık dikkate alındığında ise sıklıkla 18 cm slump değeri kullanılmaktadır (Tariq ve Nehdi, 2007; Fall ve Pokharel, 2010; Ghirian ve Fall, 2016). Ayrıca, 18 cm'lik çökme ile ÇMD, Belem ve Benzaazoua (2008) tarafından önerilen 15 cm çapında bir boru sisteminde 100 ton/saat akış hızında beslenebilmektedir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çökme deneylerinin sonuçları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Farklı PKO'lara göre çökme testi sonuçları (Slump test results according to different solid content)

Şekil 2'deki çökme testi sonuçları incelendiğinde, 18 cm değerine en yakın katı içeriği 80% olarak görünmektedir. Aynı katı içeriğinde az da olsa çökme değerlerinde farklılıklar oluşmuştur. Özellikle %80 PKO'da çökme değeri bir deneyde 20 cm iken bir başka deneyde 16 cm olarak belirlenmiştir. Aynı katı içeriğine sahip ÇMD'deki çökme azalmasının en temel nedeni, malzeme içerisindeki ince atık tanelerinin yüzey alanındaki artışla beraber tanelerdeki su ihtiyacının artması olarak ifade edilebilir (Fall vd., 2008). Benzer bir durum Şekil 2'deki sonuçlarda da görülmektedir. Macun dolgunun reolojisini doğru bir şekilde tanımlamak için hem akma gerilmesi hem de viskozitesi ölçülmelidir. Ayrıca Clark vd. (1995), çökmedeki 5 cm'lik bir artışın katı kütle konsantrasyonunda %1'lik bir azalma içerdiğini gözlemlemişlerdir. Uçucu kül tanelerinin şeklinin ve tane boyut dağılımlarının, karışımların su ihtiyacı ve işlenebilirlik gibi reolojik özelliklerine etki ettiği bilinmektedir. Bu etki, özellikle küresel tanelerin kayganlaştırıcı nitelik taşıması ve dolgu maddesi özelliğine sahip olmasıdır; bir diğer etki ise şekilsiz ve pürüzlü yüzeye sahip olan tanelerin su ihtiyacını arttırmasıdır. Ayrıca, uçucu külün tane büyüklük dağılımının çok değişken olması halinde de su ihtiyacı artmaktadır (TÇMB, 2009). Çalışmada kullanılan C tipi uçucu külün CaO oranı yüksek olduğu için hem küresel hem de köşeli düzensiz şekilli taneciklere sahiptir.

Macun dolgudaki suyun bir kısmı hidrasyon için kullanılırken, büyük bir kısmı ise macun dolgunun yer altına transferi için kullanılmaktadır. Buradaki fazla su, dayanım kazanmaya başlayan macun dolgunun gözenekliliğini etkilemekte, bu boşlukların su veya hava ile dolmasına ve sonrasında da dayanımının azalmasına sebep olmaktadır. Abdul-Hussain ve Fall (2011) çalışmalarında da TEBD ve su/çimento oranı arasındaki ilişkinin ters orantılı olduğunu söylemişlerdir. Macun kalitesini kontrol etmedeki diğer önemli faktörlerden biri su/çimento oranı olarak bilinir. Bu çalışmada ise sabit su oranı kullanıldığı için yalnızca çimento miktarlarındaki değişim su/çimento oranını etkilemiştir. %80 katı içeriğine göre %3, 5, 7, 9 ve 11 oranlarında çimento bağlayıcısı karıştırılarak hazırlanan referans numunelerinin 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine göre TEBD testi sonuçları Şekil 3'te verilmiştir.



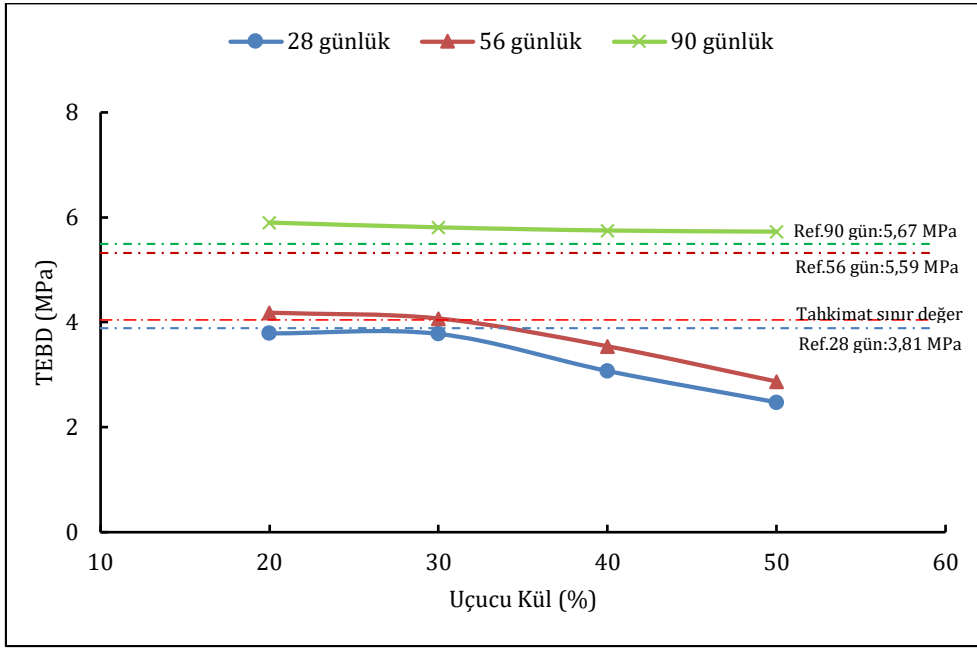
Şekil 3. Farklı çimento kullanım oranlarına göre ÇMD örneklerinin dayanım değişimi (Strength change of CPB samples according to different cement usage rates)

Fall vd. (2008) çalışmasında da su/çimento oranı 6'dan 9'a arttıkça 28 günlük tek eksenli basma dayanımının azaldığı anlaşılmaktadır. Benzer bir şekilde bu çalışmadaki su/çimento oranının çimentonun artışına bağlı olarak azalması sonucu 28 günlük TEBD değerleri Şekil 3'teki gibi lineer bir artış göstermiş ve 2,77 ile 2,27 su/çimento oranı istenilen dayanımı sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca 28 günlük dayanıma göre 4 MPa'nın üzerinde sadece %11 çimento içeriği ile oluşturulan numunelerin dayanımının kaldığı görülmektedir. Bu çalışmadaki atık malzemesinin macun dolguda yüksüz olarak kullanılabilmesi için ise en az %5 çimento katılması gerekmektedir. Uzun kür süresindeki dayanım değerleri özellikle %9 çimentodan sonra 56 günlük kür süresine göre ciddi bir düşüş sergilemektedir.

#### 4.2. ÇMD Karışımlarındaki Uçucu Kül İkamesinin Etkisi (Effect of Fly Ash Substitution In CPB Mixtures)

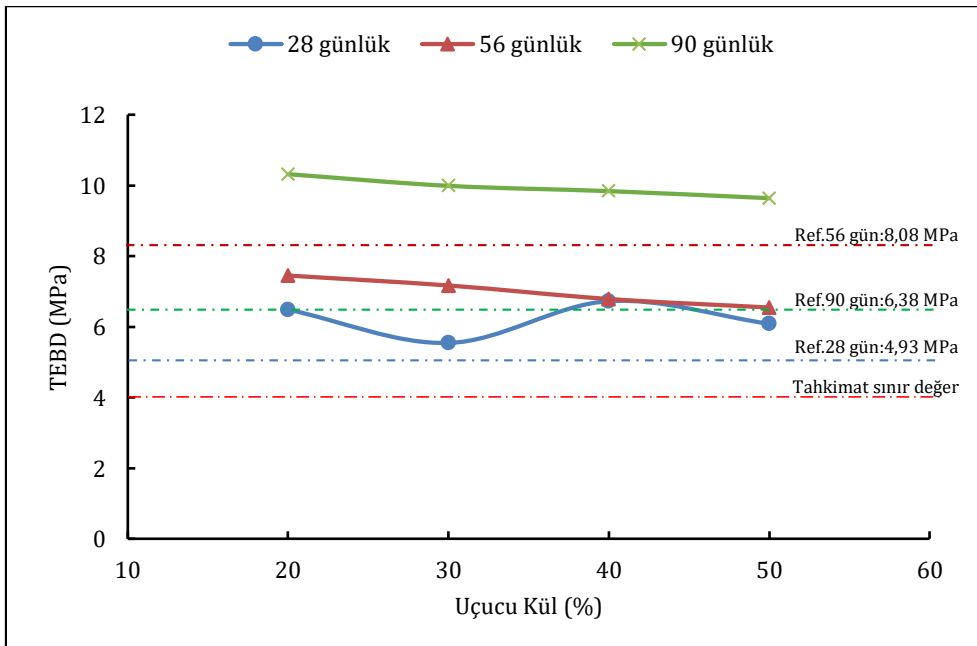
Sülfat atıklarının uzun dönemde macun dolgu dayanımları üzerindeki olumsuz etkisi bu çalışmadaki Pb-Zn atıklarında da ortaya çıkmıştır. Bu durumun azaltılabilmesi için, puzolanik bir malzeme olan uçucu kül, çimento

yerine ikame olarak belirli oranlarda kullanılmıştır. Buna göre %9 çimento içeriğinde kullanılan uçucu kül ikamesinin sonuçları Şekil 4'te verilmiştir.



**Şekil 4.** Farklı oranlarda uçucu külün ÇMD numunelerinde (%9 çimentolu) çimento ikamesi olarak kullanımında dayanım değişimi (Strength change in the use of different ratio of fly ash as cement substitute in CPB samples (9% cement))

28 günlük %9 çimento katkılı referans numunesindeki (3,81 MPa) çimento oranı temel alınarak oluşturulan %20, %30, %40 ve %50 oranlarında uçucu kül ikameli ÇMD karışımlarının dayanımları sırasıyla 3,79 MPa, 3,78 MPa, 3,07 MPa ve 2,47 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak, bu değerler tahkimat için istenilen dayanımı sağlayamamışlardır (Şekil 4). Buna karşın 56 günlük %20 (4,18 MPa) ve %30 (4,07 MPa) uçucu kül ikameli numunelerde tahkimat sınır değeri aşılmıştır. Bununla beraber 90 günlük uçucu kül ikameli ÇMD numunelerinin dayanımları ise sırasıyla 5,90 MPa, 5,81 MPa, 5,75 MPa ve 5,73 MPa olarak ölçülmüştür. Bu durum özellikle uçucu külün puzolanik özelliğinin uzun dönemdeki etkisinin yansımasıdır. Dolayısıyla %9 çimento oranına göre %30 uçucu kül ikamesinin uygun olduğu ve 56 günden sonra ise dayanım açısından daha güvenilir olduğu belirlenmiştir. Diğer bir tahkimat amaçlı karışım olan %11 çimento içeriğinde kullanılan uçucu kül ikamesinin sonuçları ise Şekil 5'te verilmiştir.



**Şekil 5.** Farklı oranlarda uçucu külün ÇMD numunelerinde (%11 çimentolu) çimento ikamesi olarak kullanımında dayanım değişimi (Strength change in the use of different ratio of fly ash as cement substitute in CPB samples (11% cement))

%11'e göre farklı oranlarda katılan uçucu külün etkisi incelendiğinde ise 28.gündeki dayanımların küçük bir aralıkta dalgalanmasına rağmen istenilen dayanımın üzerine çıktıkları Şekil 5'te görülmektedir. Bununla beraber en yüksek dayanımı veren %20 uçucu kül ikameli 28. günde 6,49 MPa, 56. günde 7,45 MPa ve 90. günde de 10,33 MPa dayanımlar sağlanarak referans numunelerin çok üzerinde değerlere ulaşılmıştır. Ancak uçucu kül miktarındaki artışa bağlı olarak özellikle 56 ve 90 günlük kür süresine sahip numunelerin dayanım değerlerinde 0,7-0,9 MPa aralığında bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca referans numunelerin tersine uzun dönemde dayanımın önemli bir oranda arttığı ve dolayısıyla sülfat atak karşısında uçucu külün puzolanik özelliğinin etkili olduğu Şekil 5'ten anlaşılmaktadır. Puzolan malzemeler, fiziksel, minerolojik ve kimyasal açıdan çimento ile benzerlik gösterse de kimyasal bileşimleri açısından karşılaştırıldığında puzolanlarda silikatlar (SiO<sub>2</sub>) çoğunlukta iken, portland çimentosunda CaO çoğunlukta. Dolayısıyla, puzolanların büyük bir kısmı kendi başına bağlayıcı özelliğe sahip olmadığından ikincil bağlayıcı maddeler olarak anılırlar. Bu durumun etkisi olarak, Şekil 5'te artan uçucu kül miktarlarına karşılık çimentodaki CaO değerlerinin yeterli gelmeyerek dayanımın azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Bununla beraber uçucu küldeki puzolanik etki, külün bileşimine ve inceliğine bağlı olarak değişebilmektedir. Özellikle linyit uçucu külleri su ile karıştırılıp kompaksiyona tabi tutulduklarında çimentolaşmadan dolayı dayanımları artmakta ise de bu dayanım kazanma özelliği oldukça yavaş ortaya çıkmaktadır. Bu etki ise genellikle, uçucu küldeki serbest CaO ve suda çözünebilen diğer bileşiklere bağlıdır. Bir başka ifadeyle, çimentolaşma özelliğinden tam yararlanmak için daha uzun bir kür süresine ve yeterli CaO'ya ihtiyaç duyulmaktadır (Alkaya, 2009).

Benzaazoua vd. (2002), %32 sülfür içeren atık ile %6 bağlayıcının %50'si kadar uçucu kül ikame edilerek hazırlanan ÇMD numunesinin 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine göre dayanımlarını sırasıyla ~600kPa, ~1000kPa ve ~1100kPa olarak bulmuşlardır. Eker (2019) ise, yine benzer sülfür içeriğine sahip farklı bir atık ile tavan tahkimatı için istenilen değeri 28 günlük kür süresine göre ~5 MPa dayanımla % 11 çimentolu - %10 ve %20 F tipi uçucu kül ikameli ÇMD karışımlarıyla sağlamıştır. 90 günlük kür süresinde ise sadece % 11 çimentolu - % 10 uçucu kül ikameli karışım 4 MPa'nın üzerinde kalabilmiştir. Bu çalışmadaki %11 çimento oranına göre farklı oranlarda çimento yerine C tipi uçucu kül ikameli ÇMD karışımlarının hepsinin 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinin tamamındaki dayanımları 4 MPa'nın üzerinde kalmıştır. Bunun nedeni olarak atık içeriğindeki sülfür oranının daha az olması ve C tipi uçucu kül kullanımının etkili olduğu düşünülmektedir.

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Madenlerde tahkimat amacı ile de kullanılabilen ÇMD'de, çimento yerine farklı katkı malzemeleri kullanılabilir. Bu çalışmada da katkı maddesi olarak bir termik santral atığı olan uçucu kül kullanılmıştır. Farklı oranlardaki uçucu kül ikameli ÇMD'lerin 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine göre dayanımları ölçülmüş ve sonuçlar daha önceden referans olarak hazırlanan katkısız numuneler ile karşılaştırılmıştır. Çimento katkısının içeriğine farklı oranlarda uçucu kül kullanılması sonucunda; referans numunelere göre, %9 çimentonun %30'una kadar uçucu kül ikamesinin özellikle 56 ve 90 günlük kür sürelerinde ve %11 çimentonun %50'sine kadar uçucu kül ikameli karışımların ÇMD yönteminde kullanılabilmesi belirlenmiştir. Deneysel çalışma sonunda uçucu kül ilâvesinin, 90 günlük bir süreç dahilinde Pb-Zn atığı karışımı ÇMD malzemesinin dayanımı üzerindeki etkisinin fazla olduğu anlaşılmıştır. Bu durum puzolanik reaksiyon ve uçucu külün boşlukları doldurma etkisi ile açıklanabilir. Ancak uçucu külün artışına bağlı olarak macun dolgudaki temel bağlayıcı olan çimento miktarının azalmasıyla ÇMD dayanımlarında az da olsa bir düşüş eğiliminin olduğu görülmüştür. Toplam kütledeki uçucu kül oranı dikkate alındığında doğru türde ve oranda bir uçucu külün macun dolgu karışımlarında kullanılmasının özellikle çimento tüketiminde ve dolayısıyla maliyetlerde ciddi bir azalma sağlayacağı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte çalışma sahasındaki Pb-Zn atıklarının tahkimat amacıyla yeraltında, fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından uygun C tipi uçucu kül ikameli ÇMD karışımları olarak kullanılabilmesi ortaya konulmuştur. Bundan sonraki çalışmalarda farklı puzolanik özellikteki malzemelerin Pb-Zn atıklarıyla yapılan macun dolguda kullanılabilirliğinin araştırılması ve alternatif karışım oranlarının bulunmasının sürdürülebilir madencilğe katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Esan Eczacıbaşı Balya Pb-Zn Yeraltı İşletmesi yöneticilerine ve çalışanlarına, Enerjisa Enerji Üretim A.Ş. Adana Tufanbeyli Termik Santrali yöneticilerine ve çalışanlarına, Akçansa Çimento Sanayi ve Tic. A.Ş. yöneticilerine ve çalışanlarına malzeme teminindeki yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

**Kaynaklar (References)**

- Abdul-Hussain N. and Fall M., 2011. Unsaturated hydraulic properties of cemented tailings backfill that contains sodium silicate. *Eng Geol* 123(4):288–301.
- Adiguzel D. and Bascetin A., 2019. The investigation of effect of particle size distribution on flow behavior of paste tailings. *Journal of Environmental Management* 243 (2019) 393–401.
- Alkaya, D., 2009. Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 5, No: 1, 2009* (61-72).
- ASTM C39., 2018. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C143., 2015. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C618., 2019. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman, P., Verburg, R., 1999. Cementitious backfill with high sulphur content: physical, chemical and mineralogical characterization. *Cem. Concr. Res.* 29 (5), 719 - 725.
- Benzaazoua, M., Belem T. and Bussière B., 2002. Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill, *Cement and concrete research*, 32: 12.
- Belem, T. and Benzaazoua, M., 2008. Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(2), 147-174.
- Brackebusch, F.W., 1994. Basics of paste backfill systems, *Mining Engineering*, 46, 1175–8.
- Cihangir, F., Ercikdi B., Kesimal A., Deveci H. and Erdemir F., 2015. Paste backfill of high-sulphide mill tailings using alkali-activated blast furnace slag: effect of activator nature, concentration and slag properties, *Minerals engineering*, 83: 117-127.
- Clark CC, Vickery JD, Backer RR, 1995. Transport of total tailings paste backfill: results of full-scale pipe test loop pumping tests. Report of investigation, RI 9573, USBM, 37 pp.
- Dong, Q., Liang, B., Jia, L., Jiang L., 2019. Effect of sulfide on the long-term strength of lead-zinc tailings cemented paste backfill. *Construction and Building Materials* 200 (2019) 436–446.
- Eker, H., 2019. Metalik Proses Artıklarının Macun Dolgu Yöntemi ile Depolanmasında Uygun Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2019.
- Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., ve Alp, I., 2009. Utilization of industrial waste products as pozzolanic material in cemented paste backfill of high sulphide mill tailings, *Journal of Hazardous Materials*, 168, 848–856.
- Fall M, Benzaazoua M, Ouellet S, 2005. Experimental characterization of the effect of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill. *Miner Eng* 18(1):41–44
- Fall, M., Benzaazoua M. and Saa, E. G., 2008. Mix proportioning of underground cemented tailings backfill, *Tunnelling and underground space technology*, 23(1): 80-90.
- Fall, M., Adrien, D., Célestin J. C., Pokharel M. and Touré, M., 2009. Saturated hydraulic conductivity of cemented paste backfill, *Minerals engineering*, 22(15): 1307-1317.
- Fall, M. and Pokharel, M., 2010. Coupled effects of sulphate and temperature on the strength development of cemented tailings backfills: portland cement-paste backfill, *Cement and concrete composites*, 32(10): 819-828.
- Ghirian, A. and Fall, M., 2015. Coupled behavior of cemented paste backfill at early ages, *Geotechnical and geological engineering*, 33(5): 1141-1166.
- Ghirian, A. and Fall, M., 2016. Long-term coupled behaviour of cemented paste backfill in load cell experiments, *Geomechanics and geoengineering*, 11(4): 237-251.
- Gorakhki, M.H. and Bareither, C.A., 2018. Compression Behavior of Mine Tailings Amended with Cementitious Binders, *Geotech Geol Eng* (2018) 36:27–47.
- Hassani F, Archibald J., 1998. Mine backfill. In: Canadian Institute of Mine, Metallurgy and Petroleum, Published on CD-ROM Proceedings, Canada, 263p.
- Hassani, F.P., Nokken, M.R., Annor, A.B., 2007. Physical and mechanical behaviour of various combinations of mine fill materials, *CIM Bull.* 2 (3), 72.
- Hefni, M. A., 2014. An investigation into the development and potential of foam minefill, PhD thesis, McGill University.
- Huang S., Xia K. And Qiao L., 2011. Dynamic tests of cemented paste backfill: effects of strain rate, curing time, and cement content on compressive strength. *J Mater Sci* (2011) 46:5165–5170.
- Jiang, H., M. Fall and L. Cui, 2017. Freezing behaviour of cemented paste backfill material in column experiments, *Construction and building materials*, 147: 837-846.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Ercikdi, B., 2004. Evaluation of paste backfill test results obtained from different size slumps with varying cement contents for sulphur rich mill tailings, *Cem. Concr. Res.* 34 (10), 1817e1822.
- Koohestani, B., Bussière, B., Belem T. and Koubaa, A., 2017. Influence of polymer powder on properties of cemented paste backfill, *International journal of mineral processing*, 167: 1-8.
- Li T, Singh U, Coxon J, Grice TG, Sainsbury D, 2002. Development and application of paste fill using dry tailings. First International Seminar on Deep and High Stress Mining, Perth, 10 pp
- Li, W. and Fall M., 2016. Sulphate effect on the early age strength and self-desiccation of cemented paste backfill, *Construction and building materials*, 106: 296-304.
- Meggyes, T. and Debreczeni, A., 2006. Paste technology for tailings management, *Land Contamination & Reclamation*, 14 (4), 2006 EPP Publications Ltd.
- Newman, P., Cadden, A., White, R., 2001. Paste - The Future of Tailings Disposal? Securing the Future, International Conference on Mining and the Environment. June 25 - July 1, Skelleftea, Sweden, pp.594 – 603.



- Ouattara, D., Yahia, A., Mbonimpa, M., & Belem, T., 2017. Effects of superplasticizer on rheological properties of cemented paste backfills. *International Journal of Mineral Processing*, 161, 28-40.
- Ouattara, D., Mbonimpa, M., Yahia, A., Belem, T., 2018. Assessment of rheological parameters of high density cemented paste backfill mixtures incorporating superplasticizers. *Construction and Building Materials*. Volume 190, 30 November 2018, Pages 294-307.
- Ramlochan, T., Thomas, M., and Hooton, R., 2004. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature: Part II: Microstructural and microchemical investigations, *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1341-1356.
- Tariq, A. and Nehdi, M., 2007. Developing durable paste backfill from sulphidic tailings, *Proceedings of the institution of civil engineers - waste and resource management*, 160(4): 155-166.
- Tariq, A., and Yanful, E. K., 2013. A review of binders used in cemented paste tailings for underground and surface disposal practices, *Journal of environmental management*, 131, 138-149
- TÇMB, 2009. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. 4. Baskı Temmuz 2009. ISBN 975-8136-18-6
- Tüylü, S. 2016, Maden tesis atıklarının yerüstünde depolanmasında en uygun tasarım koşullarının belirlenmesi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2016.
- TS EN 196-6, 2010. Çimento deney yöntemleri - Bölüm 6: İncelik tayini.
- Wang Y., Wu A., Wang S., Wang H., Yang L., Wang Y. and Ruan Z.e., 2017. Correlative mechanism of hydraulic-mechanical property in cemented paste backfill, *Journal of Wuhan university of technology-mater. sci. ed.*, 32(3): 579-585.
- Wu A., Wang Y., Wang H., Yin S. and Miao X., 2015. Coupled effects of cement type and water quality on the properties of cemented paste backfill, *International journal of mineral processing*, 143: 65-71.
- Yılmaz, E., Belem, T., Bussièrè B. and Benzaazoua M., 2011. Relationships between microstructural properties and compressive strength of consolidated and unconsolidated cemented paste backfills, *Cement and concrete composites*, 33(6): 702-715.
- Yılmaz, E., Belem, T., Benzaazoua M., 2015. Specimen size effect on strength behavior of cemented paste backfills subjected to different placement conditions. *Engineering Geology* 185 (2015) 52-62.
- Yılmaz, T. Erçıkıd, B. Cihangir, F. 2017. Yüksek fırın cürufu ve perlit ikamesinin çimentolu macun dolgunun mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), ss. 239-251, Haziran 2017.
- Yılmaz, E., 2018. Stope depth effect on field behaviour and performance of cemented paste backfills. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 32:4, 273-296



## KOCAELİ / BAŞISKELE İLÇESİ AFET VE ACİL DURUM TOPLANMA ALANLARININ YETERLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Serpil GERDAN<sup>1\*</sup>, Alper ŞEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kocaeli Üniversitesi, İzmit MYO, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup> Kocaeli AFAD İl Müdürlüğü, Kocaeli, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

AHP,  
Afet Toplanma Alanı,  
Afet Planlaması,  
Afet Risk Yönetimi,  
Kriz Yönetimi.

### Öz

Doğal ya da insan kaynaklı tehlikelerin afete dönüşmemesi, koruyucu ve önleyici önlemlerin alınması ve risk azaltma faaliyetlerinin yürütülmesi ile mümkündür. Afetler sırası ve sonrasında kullanılmak üzere belirlenecek toplanma alanlarının kişi başına düşen alan açısından büyüklüğü, dağılım ve altyapı gibi özelliklerinin değerlendirilerek belirlenmesi afet yönetiminin en önemli konularından biridir. Bu çalışmada, Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı (AFAD) İl Müdürlükleri tarafından mahalle ve bölge düzeyinde belirlenen toplanma alanlarının yeterlikleri Kocaeli Başiskele ilçesi özelinde değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında mevcut toplanma alanları uluslararası kriterlere bağlı olarak sınıflandırılmış, ikinci aşamada ise bu alanların kriterlere göre uygunluk değerleri Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi ile belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları Kocaeli ilinin Başiskele ilçesi için belirlenen toplanma alanlarının %77,14'ünün elektrik ve su altyapısına sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen veriler 22 mahallede belirlenmiş toplanma alanlarından sadece 5'inin metrekare açısından uygun olmadığını göstermektedir. Çalışmanın sonuçlarının afet planlama çalışmalarının verimliliğini artırarak bölgenin afet risk yönetimi ve müdahale kapasitesinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı umulmaktadır.

## EVALUATION OF QUALIFICATIONS OF DISASTER AND EMERGENCY ASSEMBLY POINTS FOR KOCAELİ BAŞISKELE DISTRICT

### Keywords

AHP,  
Disaster Assembly Point,  
Disaster Planning,  
Disaster Risk Management,  
Crisis Management.

### Abstract

Natural and technological hazards do not turn into disasters by preventive and protective activities and risk reduction. One of the most important activities in disaster management is determining the size, distribution, and infrastructure of assembly points that should be taken into consideration to be used during and post-disaster. In this study, we examined the qualification of assembly points identified neighborhood and local level by the Provincial Directorates of Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD) in the case of Kocaeli/Başiskele district. In the first phase of the study, the existing Assembly Points were classified according to international criteria, and in the second phase, the suitability values of these areas according to the criteria were determined by the Analytical Hierarchy Process (AHP) method. The results of this study show that 77,14% of the assembly points designated for Başiskele have electricity and water infrastructure. According to data, it is found that only 5 of 22 neighborhood assembly points do not appear as proper assembly points in terms of square meters. We expect that our research outcomes should provide enhance the efficiency of planning studies, and contribute to the development of the region's capacity for disaster response and resilience.

### Alıntı / Cite

Gerdan, S., Şen, A., (2020). Kocaeli/ Başiskele İlçesi Afet ve Acil Durum Toplanma Alanlarının Yeterliklerinin Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 489-500.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
S. Gerdan, 0000-000 1-9126-7808	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	03.02.2020
A. Şen, 0000-0002-8047-0330	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	01.05.2020
	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	04.05.2020
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

## 1. Giriş (Introduction)

İnsanlığın başlangıcıyla birlikte bireysel yaşamdan toplumsal yaşama geçiş başlamıştır. Toplulukların oluşmasını takiben yaşam alanlarını ve çevreyi olumsuz etkileyecek doğadan veya insandan kaynaklı tehlikeler ve tehditler meydana gelmiş ve toplumsal faaliyetler kesintiye uğramıştır. Günümüzde, normal yaşamı ve insan faaliyetlerini durdurarak veya kesintiye uğratarak toplulukları etkileyen doğal, teknolojik veya insan kökenli tehlikelerin yerel imkanlarla baş edilemeyecek boyuta ulaşması afet olarak tanımlanmaktadır (Kadıoğlu, 2008). Aslında bu tanımın vurgusu olayın kendisinden çok, ortaya çıkan sonuçların afet olarak nitelendirilmesidir (Gerdan ve Şen, 2019). Birleşmiş Milletler Uluslararası Doğal Kaynaklı Afet Azaltılması On Yılı Sekreteryası (IDNDR: International Decade for Natural Disaster Reduction), tehlikelerden kaynaklanan risklerin olumsuz etkilerinin giderilmesi için bireyden topluma her kesimin sorumluluğunun olduğuna vurgu yapmaktadır (Güvel, 2001). Ayrıca, Sendai Afet Risk Azaltma Çerçevesi Eylem Planında (2015-2030) tehlikelerden kaynaklanan risklerin olumsuz etkilerinin giderilmesi için bireyden topluma her kesimin sadece sorumluluğunun değil katılımının da gerekli olduğuna vurgu yapılmaktadır. İnsanlar tarafından korkutucu ve afet ya da felaket olarak nitelendirilen deprem, fırtına, sel veya volkanik patlamalar gibi doğadan kaynaklı olaylar, yeryüzünün fiziki özelliklerinin oluşumunun birer parçasıdır. Her yıl çeşitli sıklık ve büyüklükte meydana gelen doğa olaylarının sonucunda yaşanan can ve mal kayıpları aslında insanoğlunun yaşadığı çevreyi iyi algılayamamasının bir sonucudur ve risk teşkil eden bölgelerde planlamadan yoksun yerleşim alanlarının kurulması insan hayatına mal olabilmektedir (Birand ve Ergünay, 2001; Demirci ve Karakuyu, 2014; Gerdan ve Şen, 2019). Gelişen teknoloji ve yönetim anlayışı, afetlerle mücadelenin sadece afet anında hızlı ve etkili müdahale ile sınırlı olmadığını açıkça göstermektedir. Ülkeler üzerinde farklı etkilere sahip olabilmeye potansiyellerinden dolayı afetlerle mücadele hem zordur hem de tek bir doğru model yoktur. Bu nedenle, bilimsel ve teknolojik gelişmelerin kullanıldığı, eğitim, hazırlık faaliyetlerini ve yönetimi de kapsayan modellerin geliştirmesi gerekir (Press ve Hamilton, 1999).

Türkiye, gerek meteorolojik gerekse jeolojik ve topografik koşullara bağlı olarak sıklıkla afetlere maruz kalmaktadır. Ekonomik durum ve nüfus yoğunluğu gibi bölgesel şartlara bağlı olarak bu kayıplar gün geçtikçe artan bir eğilim göstermektedir (Erkan vd., 2018). İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı (AFAD)'ın Doğal Kaynaklı Afet İstatistiği Raporuna göre ülkemizde 1900-2018 yılları arasında 210 yıkıcı deprem (en az 6 büyüklüğünde), 6334 sel/su baskını, 23041 heyelan ve 1539 çığ meydana gelmiştir. Bu afetlerden sadece deprem kaynaklı can kaybı sayısı 86000'in üzerindedir (AFAD, 2019). Bu durum ülkemiz coğrafyasını tehdit eden tehlikeler dikkate alınarak bölgesel risk azaltma çalışmalarının yürütülmesini kaçınılmaz kılmaktadır.

Afet ve acil durum yönetimi geçmiş deneyimlerle geliştirilen ve süreklilik gerektiren bir yönetim şeklidir. Kriz anında sürdürülebilir bir anlayışın benimsenmesi ve krizin en hafif hasarla atlatılabilmesi için sorumlu kurumlar arasında işbirliği ve koordinasyonu gerekir. Başarılı bir afet ve acil durum yönetim sistemi; afet öncesi, sırası ve sonrası aşamaları sistem içerisinde barındıran, tüm paydaşların sisteme dahil edildiği ve tüm etkilerin ön görülebildiği modellerin geliştirilebilmesi ile mümkün olabilir. İnsanlara sosyal ve kültürel avantajlar sunulmasına bağlı olarak kentsel alana artan ilgi toplumu maalesef tehlikelere karşı daha kırılgan hale getirmektedir. Bunların sonucu olarak kentler fiziksel, ekonomik ve sosyal kayıpların en ağır biçimde gerçekleştiği alanlar olmakta, tehlike kaynaklı riskler değişirken, kentte yaşayan nüfus başta olmak üzere diğer zarar görebilirlikler de artmaktadır (Da Silva ve Morera, 2014).

Bu bağlamda, araştırmamıza konu olan, Kocaeli Yarımadasının temel kayaları Palezoik yaşlı kalın bir çökel istif ile temsil edilmektedir. Bölge Kuzey Anadolu Fayı ve onun kolları ile gelişmiş sağ yanal atımlı faylarla karakterize edilmesi nedeniyle de aktif fay kuşağı üzerinde yer almaktadır (Çuvaş, 2002). Yüzölçümü 3.623 km<sup>2</sup> olan Kocaeli ili 29°22'-30°21'E, 40°31'-41°13'N coğrafi koordinatlarında olup kuzeyinde Karadeniz, doğusunda Sakarya, güneyinde Bursa ve batısında İstanbul ile Yalova illeri bulunmaktadır. 2019 nüfusu, tahmini verilere göre 1.946.252 ve kilometre kareye düşen kişi sayısı da 526'dır. 1900-2016 yılları arasında aletsel büyüklüğü 2 den büyük ve 7,4 den küçük toplam 5.301 deprem meydana gelmiştir (Akyürek ve Arslan, 2018).

Bu çalışma ile Kocaeli ili Başiskele ilçesinde Kocaeli AFAD İl Müdürlüğü tarafından mahalle/bölge ölçeğinde belirlenmiş 35 adet toplanma alanının konum, nitelik ve ortaya çıkacak ihtiyaçları karşılayabilme kapasiteleri açısından yeterlilik düzeyleri değerlendirilmiştir. Yüzölçümü 215 km<sup>2</sup> olan ilçede, km<sup>2</sup> ye yaklaşık 293 kişi düşmektedir. İlçenin kuzeyi İzmit Körfezi ve İzmit ilçesi, güneyi Bursa ve Sakarya ili, doğusu Kartepe ilçesi ve batısı

Gölcük ilçesi ve Bursa ili ile çevrilidir. Zengin su kaynaklarına sahip olan ilçede Yuvacık barajı yer almaktadır. 2018 yılı nüfus verilerine göre ilçenin toplam nüfusu 97.817 dir (URL-6).

## 2. Afet ve Acil Durum Toplanma Alanlarının Standartları (Standards of Disaster and Emergency Assembly Points)

Genel olarak afet ve acil durumlar için belirlenen toplanma alanları, olağan durumlarda yeşil alan veya park olarak kullanılan ancak afet anı ve tahliye sonrasında acilen ulaşılabilecek, güvenli bölge olarak nitelendirilen alanlardır (Gerdan ve Şen, 2019). Bu nedenle gerek fiziksel, yapısal, altyapı, ulaşım gerekse doğal yapı, jeolojik ve coğrafi olarak risk oluşturmayacak yerleşime uygun alanlardan seçilmeli ve insani temel ihtiyaçları karşılayabilecek donanımına sahip olmalıdır (Maral vd., 2015). Afete maruz bireylerin bilgilendirilmesi başta olmak üzere acil yardım ekipleri ile koordinasyon ve geçici barınma gibi birçok afet öncesi risk yönetimi planlama ve tahliye tatbikatları, afet sırası ve sonrası kriz yönetimi ve lojistik faaliyetleri yine toplanma alanları tasarım çalışmaları üzerinden yürütülmektedir (JICA, 2002; Aksoy vd., 2009; Çınar vd., 2018).

Bu alanların kapasite ve mekânsal dağılımlarının afet sırası ve sonrası için orta ve uzun vadeli birçok faaliyete katkı sağlayacağı unutulmamalıdır (Erdin vd., 2017). Kısa vadede toplanma ve temel ihtiyaçların karşılanması, orta ve uzun vade de ulaşım ve lojistik hizmetlerin yürütülmesi bu alanlar için kritik görevlere örnek olarak verilebilir. Bu nedenle mevcut belirlenmiş toplanma alanlarının durumlarının değerlendirilmesi veya üstlenecekleri görevlere bağlı olarak yeni toplanma alanlarının belirlenmesinde kapasite, yer seçimi, mekânsal dağılım, koordinasyon ve lojistik hizmetlerinin nasıl sağlanacağına iyi değerlendirilmesi gerekir (Erden ve Coşkun, 2010; Çavuş, 2013; Kırçın vd., 2017). Bu alanların afet sonrası hizmetlerin yürütülmesi açısından adapte olabilir nitelikte olması da bir diğer önemli konudur. Park, bahçe ve rekreasyon alanı olarak tanımlanan açık yeşil alanlar, meydan, yol gibi kamusal veya özel mülkler ve tüm açık alanların deprem başta olmak üzere afetler sonrası afetzedeler için kısa ve uzun vadede sığınma ve barınma ihtiyaçlarının karşılanacağı mekanlar haline dönüştürülebilir nitelikte olması gerekir (Gül ve Küçük, 2001; Çelik vd., 2018; Yalçın Çal ve Aydemir, 2018; Gerdan ve Şen, 2019).

Toplanma alanlarının belirlenmesine yönelik kriterler ile yer seçimine dair standartlar ulusal ve uluslararası birçok çalışmada belirtilmiştir. Yer seçimi kriterleri Çınar ve diğ. (2018) ve JICA, (2002)'ye göre 5 ana başlık altında toplanmıştır (Çınar vd., 2018; URL-1; URL-2, JICA, 2002).

1. Uzaklık ve erişilebilirlik: Yapı alanlarına olan uzaklık göz önünde bulundurulmalı, 0-500 m yürüyüş mesafesinde, tahliye alanının sınırına yakın ve herkes tarafından erişilebilir olmalıdır.
2. Ana yol bağlantıları: Ana yollarla bağlantılı alanlar ve riskli yollara ait alternatifler değerlendirilmelidir.
3. Çok fonksiyonluluk ve kullanım: Mevcut yeşil alanlar, çocuk oyun alanları ile parklar, okul veya cami gibi kapalı alanlar değerlendirilmelidir.
4. Kamu arazileri: Kamuya ait araziler öncelikli alanlar olarak değerlendirilmeli, yapısal olarak güvenli olup olmadıkları dikkate alınmalıdır.
5. Büyüklük: JICA, (2002)'ya göre kişi başına minimum 1,5 m<sup>2</sup>, Tarabanis ve Tsionas (1999)'a göre ise 2 m<sup>2</sup> olarak kabul edilmektedir (JICA 2002; Tarabanis ve Tsionas, 1999).

## 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

### 3.1. Kocaeli İl Afet Müdahale Planı ve Toplanma Alanları (Kocaeli Provincial Disaster Response Plan and Assembly Points)

Toplanma alanlarının Türkiye'deki durumuna yönelik en önemli strateji Türkiye Afet Müdahale Planı (TAMP) bünyesinde geliştirilmiştir. TAMP içinde afet öncesi, sırası ve sonrası için acil durum toplanma alanlarının belirlenmesi, uygunluğunun kontrol edilmesi, tahliye öncelikleri, tahliye yolları ve tahliye edilecek bölgelerin saptanması, planlama ve uygulama süreçleri ile ilgili detaylı bilgiler yer almaktadır. (URL-3). Türkiye genelinde TAMP, 2014 yılında yayımlanmış; 2015 yılı başında ulusal düzey hizmet grubu planları hizmete alınmıştır. Ayrıca, Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliğinin 24. Maddesi 10-p bendinde de toplanma alanları ile ilgili kurum ve kuruluşlardan verilerin elde edilmesi ve analizi ile ilgili hükümlere yer verilmiştir (URL-4). Afetlere yönelik il düzeyindeki faaliyetler Afet ve Acil Durum İl Müdürlükleri tarafından yürütülmektedir. 15 Temmuz 2018 tarihinde yayınlanan 4 No'lu Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi ile Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı İçişleri Bakanlığına bağlanmıştır. TAMP kapsamında 2015 yılında Kocaeli AFAD İl Müdürlüğü tarafından Kocaeli Afet Müdahale Planı (KAMP) hazırlanmıştır. Plan, afet ve acil durum yönetimi konusunda yetkili kurumlar ile bunların iş tanımları ve görevlendirmeleri ile tüm ilçeler için Afet Toplanma Alanlarına ait verileri içermektedir. 27 Eylül 2018 tarih ve 328500907-952.01.03 sayılı talimat ile Kocaeli ili sınırlarında belirlenmiş afet ve acil durum toplanma alanlarının belirlenmesinde nüfus yoğunluğu, ulaşılabilirlik ve tahliye kolaylığı, engelli ve yaşlıların erişebilirliğinin

uygunluğu, yangın, heyelan, su taşkını, tsunami ve benzeri gibi ikincil tehlikeler ile deniz, akarsu kenarları, sıvılaşma olabilecek alanlar, fay hatlarına yakınlık, engebesiz düz arazilerin seçilmesi, elektrik, su, tuvalet gibi temel ihtiyaçların ve benzeri unsurların dikkate alınarak mümkün olduğunca kamuya ait uygun alanların mekansal verilerinin belirlenmesi ve/veya daha önce belirlenmiş verilerin güncellenmesinin sağlanması çalışmaları başlatılmıştır (Gerdan ve Şen, 2019).

### 3.2. Başiskele İlçesi Toplanma Alanları (Başiskele District Assembly Points)

Kocaeli ili, 1999 depreminde acı kayıplar yaşamış olup tektonik açıdan aktif bir bölgede yer almaktadır. Başiskele ilçesi, 1999 yılında Gölçük merkezli yaşanan depremin yaşandığı ilçe olması sebebiyle Kocaeli ilinin deprem açısından en kırılgan ilçelerinden biridir. Bu nedenle ilçe sınırları içerisinde belirlenecek toplanma alanları afetlere dirençlilik açısından oldukça önemli bir konu olarak dikkat çekmektedir. Başiskele ilçesi için 22 mahallede afetzedelerin toplanacağı 35 adet açık alan toplanma alanı belirlenmiştir ve bu alanların tamamına yakını park, spor tesisi ve okullardan seçilmiştir (URL-5: TAMP Kocaeli, 2018).

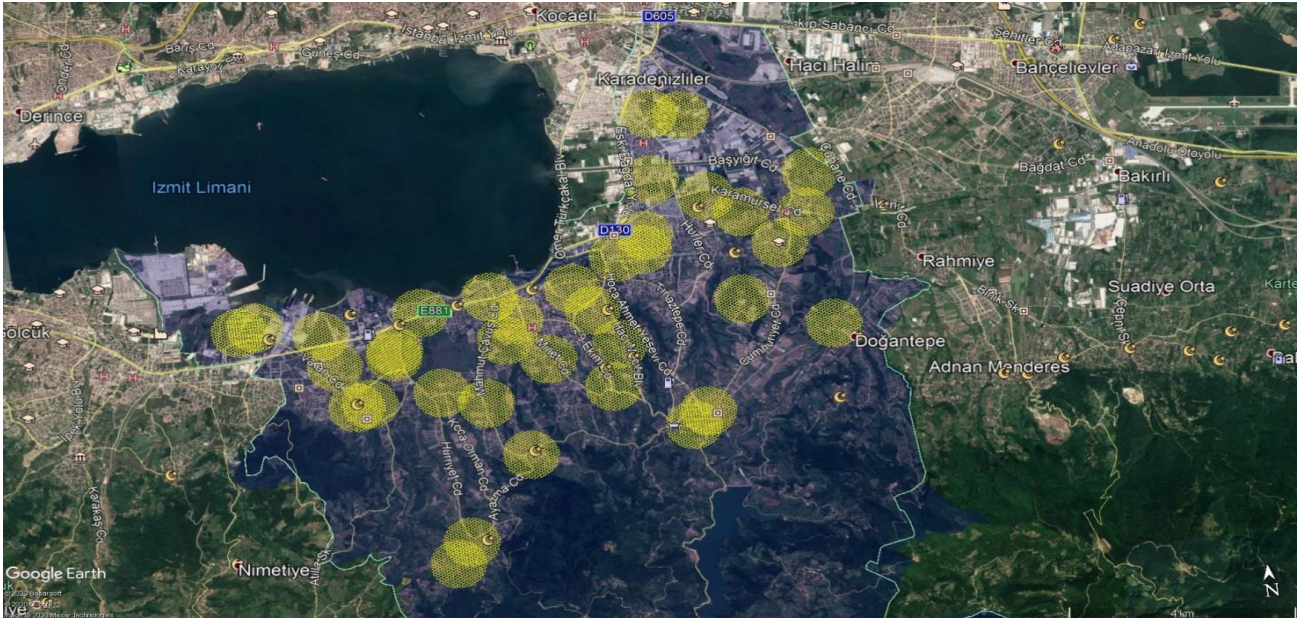
Bu çalışmada, Başiskele ilçesi için belirlenmiş toplanma alanlarının yeterlikleri uluslararası kriterler ve aşağıda özetlenmiş bileşenlere bağlı olarak değerlendirilmiştir.

- (i) Toplanma alanı olarak kullanılabilir kentsel alanların dağılımı, büyüklükleri, sunduğu olanaklar, dağılımları ve birbiri ile bağlantıları,
- (ii) Stratejik noktalar ve toplanma alanlarını birbiri ile bağlayan kaçış ve bağlantı yollarının durumunun uygunluğu, alternatifli olup olmadığı.

Kocaeli TAMP kapsamında Körfez ilçesinde petrokimya tesislerinin ve Başiskele ilçesinde Yuvacık Barajının olası ikincil afet riski taşıması nedeniyle bu iki ilçe için belirlenen alanlar aynı zamanda stratejik tahliye alanları olarak da ifade edilmektedir. AFAD il müdürlüğü kişi başına düşen boş alan açısından toplanma alanlarına yönelik kriteri ilçe bazında 2 m<sup>2</sup> olarak planlanmış ve alan belirleme çalışmalarına bu doğrultuda başlanmıştır. 2015 yılında gerçekleştirilen toplanma alanları yer seçimi sürecinde her ne kadar mevcut toplanma alanlarının belirlenmesinde tehlike ve tehditlere karşı korunabilen, kontrol merkezlerine yakın mesafede, genişlemeye uygun alanlar tercih edilmiş olsa da maalesef zemin açısından değerlendirme bir ön koşul olarak kullanılmamıştır.

### 4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Afet anında kişilerin toplanması için uygun alanların belirlenmesi, bireylerin hızlı ve etkin bir şekilde organize olabilmeleri, müdahale, hasar tespit ve insani yardım ihtiyaçlarının daha hızlı karşılanabilmesi, eksik veya kayıp kişilerin tespiti ve gerekli arama kurtarma çalışmalarının yönlendirilmesi oldukça önemlidir (Çiçekdağı ve Kırış, 2012). Başiskele ilçesi sınırlarında ilgili talimatla 2019 yılında son güncellemeleri yapılan afet ve acil durum toplanma alanlarına ait bilgiler çalışma içerisinde belirlenen kriterler ve bileşenler doğrultusunda Ek-1'de listelenmiş olup afet ve acil durum toplanma alanlarının mekansal dağılımları Şekil 1'de gösterilmiştir.



**Şekil 1:** Başiskele İlçesi Toplanma Alanlarının Mekansal Dağılımı (500 m yarıçapta-yaklaşık 5 dk yürüme mesafesi) (çizgi ölçeği 4 km/birim dir) (Spatial Distribution of Başiskele District Assembly points- 500 m radius, 5 min. walking distance)

Ek-1 verilerine göre Başiskele ilçesi toplanma alanlarının ulaşım, altyapı ve kişi başı alan açısından uygunluk dağılımı Tablo 1’de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Başiskele İlçesi Toplanma Alanları Uygunluk Dağılımı (Distribution of relevance to Başiskele District Assembly points)

		Uygun Toplanma Alanı		Uygun Olmayan Toplanma Alanı	
		f	%	f	%
Ulaşım	Ana caddeye cephe	24	68,57	11	31,43
	Denize uzaklık (>200 m)	32	91,43	3	8,57
	Yüksek yapılardan uzaklık (>30 m)	25	71,43	10	28,57
	Yaya yolu	32	91,43	3	8,57
	Engelli yolu	27	77,14	8	22,86
Altyapı	Elektrik	27	77,14	8	22,86
	Su	27	77,14	8	22,86
	WC	26	74,29	9	25,71
Kişi başı alan	0-0,99 m <sup>2</sup>			2*	5,71
	1-1,99 m <sup>2</sup>			3*	8,57
	2-2,49 m <sup>2</sup>			3*	8,57
	2,5 m <sup>2</sup> büyük	14*	63,63%		

\*Kişi başı alan mahalle bazında hesaplanmıştır.

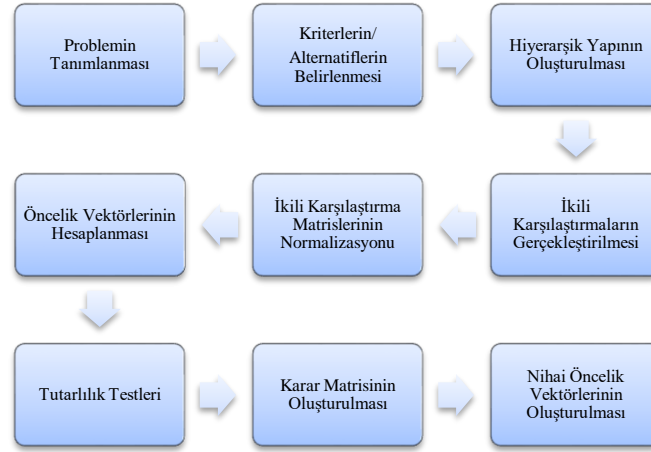
Başiskele ilçesi için AFAD İl Müdürlüğü tarafından afet ve acil durumlarda kullanılmak üzere belirlenen 35 adet toplanma alanının %68,57’si (f=24) ana caddeye cephe, % 91,43’ü (f=32) denize 200 m’den daha uzak, %71,43’ü (f=25) yüksek yapılardan 30 m’den daha uzak konumda yer almaktadır. Toplanma alanlarının %91,43’ü (f=32) yaya yoluna sahip, %77,14’ü (f=27) ise engelli (özel gereksinimli bireylerin erişilebilirliği) yoluna sahiptir. 35 toplanma alanının 27 tanesi (%77,14) elektrik ve su altyapısına sahipken, 26 tanesinde (%74,29) WC mevcuttur. Fatih Mahallesinde bulunan Yuvacık İlk ve Ortaokulu toplanma alanı 0,25 m<sup>2</sup> ile kişi başına düşen alan açısından en uygunsuz alan iken, Ovacık Mahallesi-Kullar açık spor tesisi toplanma alanı 25 m<sup>2</sup> ile kişi başına düşen alan açısından en uygun alan olarak görünmektedir.

## 5. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi ile Toplanma Alanlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of Assembly Points by Multi-Criteria Decision Making Method)

Çok kriterli karar verme yöntemleri seçme, sıralama ve sınıflandırma olmak üzere üç ana başlık içermektedir. Günümüzde bu alanda çok sayıda yöntem ve teknik kullanılmakta olup bunlara, AHP, TOPSIS, ANP, VIKOR, ELECTRE, MACHBETH, MAUT/UTA gibi yöntemler örnek olarak verilebilir (Çelikkilek, 2018). Çok kriterli karar verme tekniklerinde zaman içerisinde yaşanan gelişim ve çeşitlilik, karar verme aşamasında hangi seçeneğin tercih edilmesi gerektiği hususunu ortaya çıkarmaktadır. İdeal yöntemle ilişkin bir kural bulunmamakla birlikte problemin niteliği ile yöntemin uyumunun dikkate alınması önemlidir. Bu çalışma için belirlenen karar verme yöntemi Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) olarak belirlenmiştir.

### 5.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) Yöntemi (Analytical Hierarchy Process Method)

AHP, 1980 yılında Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen, yaygın olarak seçme veya sıralama problemleri için kullanılan bir yöntemdir (Saaty, 1980). Bu yöntem karar verme problemlerinin çözümünde sadelik, kolay anlaşılabilirlik ve rahat kullanılabilirlik amacıyla geliştirilmiştir (Aktaş vd., 2015). AHP yönteminin özü, kriterler ile alternatifler arası ikili karşılaştırma esasına dayanmaktadır. Tüm kriterler arasında önem seviyelerinin belirlenmesi karar vericinin görüşlerine dayanmaktadır. Problemin tanımlanması ile başlayıp nihai önceliğin belirlenmesi ile biten AHP akış şeması Şekil 2’de şematik olarak verilmiştir. Karar vericiler tarafından kriterlerin değerlendirilmesinde Saaty tarafından geliştirilen 1-9 ölçeği kullanılarak kriterler arasında bir öncelik sırası oluşturulur (Yıldırım ve Önder, 2018).



Şekil 2. AHP Akış Şeması (Çelikbilek, 2018) (Analytical Hierarchy Process –AHP- flow chart)

Kriterler ve alternatifler arasında karar vericiler tarafından yapılan önem sıralaması ve karşılaştırmada kullanılan Saaty'nin 1-9 ölçeği Tablo 2'de, Saaty ölçeğini kullanılarak kriterler arasında yapılan göreceli puanlama matrisi ise Tablo 3'de verilmiştir (Saaty, 1990).

Tablo 2. AHP İkili Karşılaştırma Ölçeği (Saaty, 1990) (AHP Binary Comparison Scale)

Sayısal Değer	Önem Derecesi
1	Eşit derecede önemli
3	Biraz önemli
5	Önemli
7	Çok Önemli
9	Son derece önemli
2,4,6,8	Ara değerler

Tablo 3. AHP İkili Karşılaştırma Matrisi (AHP Binary Comparison Matrix)

Kriterler	1	2	3	...	n
1	$w_1/w_1$	$w_1/w_2$	$w_1/w_3$	...	$w_1/w_n$
2	$w_2/w_1$	$w_2/w_2$	$w_2/w_3$	...	$w_2/w_n$
3	$w_3/w_1$	$w_3/w_2$	$w_3/w_3$	...	$w_3/w_n$
...	...	...	...	...	...
n	$w_n/w_1$	$w_n/w_2$	$w_n/w_3$	...	$w_n/w_n$

Matrisin köşegen değerlerinin her biri kriterin kendi puanına bölünmesiyle köşegen 1 değerini alır.  $w_2/w_1$  değeri ikinci kriterin birinci kriter ile karşılaştırılmasını ifade etmektedir. Bu oran iki numaralı kriterin bir numaralı kriterle göre ne derece önemli olduğunu gösterir (Şahin ve Akyer, 2011; Hazırcı ve Şahin, 2019). İkili karşılaştırmalar matrisinin elde edilmesinin ardından ( $a_{ij}$ ), ölçütlerin birbirine göreceli değerleri sütun toplamına bölünerek ölçütlerin normalize edilmiş değerleri belirlenir. Normalize edilmiş ikili karşılaştırma matrisi denklem 2.1 yardımı ile elde edilir (Saaty, 1994).

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2.1)$$

Normalizasyon adımından sonra, normalize edilmiş ikili karşılaştırma matrisinin satır ortalamaları alınarak öncelik vektörü bulunur. Öncelik vektörü (önem değeri) için denklem 2.2 kullanılmaktadır. Burada,  $c_{ij}$  = i. öğenin j. öğeye göre önem değerini ifade etmektedir.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (2.2)$$

## 5.2. Başiskele İlçesi İçin Kriterlerin Belirlenmesi ve Öncelik Vektörü (Determination of Criteria and Priority Vector for Başiskele District)

AHP yönteminin temelinde her bir kriter için alternatiflerin değerlendirilerek karar vericiler açısından en uygun ve doğru sonucun elde edilmesi yatmaktadır. Bu nedenle normal şartlarda afet ve acil durumlarda kullanılmak

üzere belirlenecek toplanma alanları için mevcut alternatiflerin kriterlere bağlı olarak değerlendirilmesi gerekir. Ancak il veya bölgenin plansız ve hızlı kentleşmesi, nüfus yoğunluğunun planlamadan bağımsız artışı gibi sebeplere bağlı olarak bunu gerçekleştirmek çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Çalışmanın bu bölümünde Başiskele ilçesi için afet ve acil durumlarda kullanılmak üzere belirlenmiş toplanma alanlarının değerlendirilmesi AHP yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kriterler ve bu kriterlere bağlı alt kriterlerin hiyerarşisi oluşturulmuş ve kriterlerin öncelik vektörü hesaplanmıştır. Afet ve acil durum toplanma alanları için değerlendirme kriterleri bilimsel yazın araştırması, uluslararası standartlar ve AFAD Kocaeli İl Müdürlüğünde görevli personellerin görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Ana kriterler ulaşılabilirlik (A1), altyapı (A2) ve kapasite (A3) olmak üzere 3 başlık altında toplanmıştır. Belirlenen A1 ana kriteri 5 ve A2 ana kriteri 3 adet alt kriterle sahiptir. Ana ve alt kriterler Tablo 4' de verilmiştir.

**Tablo 4.** Ana ve Alt Kriterler (Main and Sub Criteria)

Ana Kriter	Alt Kriter Numarası	Alt Kriterler
Ulaşılabilirlik (A1)	U1	Ana caddeye cephe
	U2	Denize uzaklık (>200 m)
	U3	Yüksek yapılardan uzaklık (>30 m)
	U4	Yaya yolu
	U5	Engelli yolu
Altyapı (A2)	AY1	Elektrik
	AY2	Su
	AY3	WC
Kapasite (A3)		2 m <sup>2</sup> den büyük kişi başı boş alan

Belirlenen kriterlerin ağırlıklandırılması için bir form hazırlanmış ve Kocaeli AFAD İl Müdürlüğünde görevli, alanında deneyimli uzmanlar ile 2019 Aralık ayı içerisinde belirli dönemlerde görüşmeler yapılmıştır. Ana kriterler için ikili karşılaştırma ile normalizasyon ve öncelik vektör tablosu Tablo 5 ve Tablo 6' da, alt kriterler için ikili karşılaştırma ile normalizasyon ve öncelik vektör tabloları sırasıyla Tablo 7, 8, 9 ve 10'da verilmiştir.

**Tablo 5.** Ana Kriterler İkili Karşılaştırma Matrisi (Main Criteria Binary Comparison Matrix)

Ana Kriterler	A1	A2	A3
A1	1	1,527524	0,845154
A2	0,654653	1	0,333333
A3	0,632456	3	1

**Tablo 6.** Normalizasyon ve Öncelik Vektörünün Belirlenmesi (Determination of Normalization and Priority Vector)

Ana Kriterler	A1	A2	A3	Öncelik Vektörü (W)
A1	0,43723	0,27634	0,38795	0,3671
A2	0,28623	0,18091	0,15301	0,2067
A3	0,27653	0,54273	0,45903	0,4261

**Tablo 7.** Ulaşım Alt Kriterleri İkili Karşılaştırma Matrisi (Transportation Sub-Criteria Binary Comparison)

Kriterler	U1	U2	U3	U4	U5
U1	1	0,6546	0,1259	1	0,8164
U2	1,5275	1	0,5773	2,2360	3,8729
U3	7,9372	1,7320	1	5	5,916
U4	1	0,4472	0,2	1	3
U5	1,2247	0,2581	0,1690	0,3333	1

**Tablo 8.** Ulaşım Alt Kriterleri İçin Normalizasyon ve Öncelik Vektörünün Belirlenmesi (Determination of Normalization and Priority Vector for Transportation Sub-Criteria)

Kriterler	U1	U2	U3	U4	U5	Öncelik Vektörü (W)
U1	0,078	0,159	0,060	0,104	0,055	0,099
U2	0,120	0,244	0,278	0,233	0,265	0,214
U3	0,625	0,423	0,482	0,522	0,405	0,510
U4	0,078	0,109	0,096	0,104	0,205	0,094
U5	0,096	0,063	0,081	0,034	0,068	0,080



**Tablo 9.** Altyapı Alt Kriterleri İkili Karşılaştırma Matrisi (Infrastructure Sub-Criteria Binary Comparison Matrix)

Kriterler	AY1	AY2	AY3
AY1	1	0,258199	0,333333
AY2	3,872983	1	1,732051
AY3	3	0,57735	1

**Tablo 10.** Altyapı Alt Kriterleri İçin Normalizasyon ve Öncelik Vektörünün Belirlenmesi (Determination of Normalization and Priority Vector for Infrastructure Sub-Criteria)

Kriterler	AY1	AY2	AY3	Öncelik Vektörü (W)
AY1	0,12701	0,14066	0,10874	0,12547
AY2	0,49193	0,54479	0,56503	0,53392
AY3	0,38105	0,31453	0,32622	0,34060

Tamamlanmış ikili karşılaştırmaların, kendi içerisinde tutarlı olup olmadığının tespit edilmesi gerekir. Tutarlılık testlerini gerçekleştirebilmek için;

- Uyum İndeksi (CI; consistency index)
- Rastgele İndeks (RI; Random Consistency Index)
- Uyum Oranı (CR)

değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

CR =  $\frac{CI}{RI}$  formülü tutarlılık oranının hesaplanması için kullanılır. Tutarlılık indeksinin (CI) rassal tutarlılık indekse (RI) bölünmesiyle elde edilen oranın 0,1 değerinden küçük olması karşılaştırmanın tutarlı olduğunu gösterir. Hesaplamalarda kullanılacak olan rastgele indeks (RI) değeri, kriter sayısına göre değişen ve Thomas Saaty tarafından rastsal üretilen karşılıklı kıyaslama matrisinin büyük örnekleminden geliştirilmiş olan değerlerdir (Yıldırım ve Önder, 2018). CR değerinin bulunabilmesi için uyum indeksi (CI) ve rastgele indeks (RI) değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. n kriter sayısı olmak üzere, Uyum indeksi denklem 2.3 eşitliği yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (2.3)$$

$\lambda$  (Lamda) değerini bulmak için, öncelikle normalize edilmemiş haliyle a karşılaştırma matrisi ile w öncelik vektörünün matris çarpımından aşağıdaki d sütun vektörü elde edilir (Denklem 2.4).

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_n \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

d sütun vektörünün w sütun vektörünün karşılıklı elemanlarına bölünmesi ( $E_i$ ) ile  $\lambda$  değerine ulaşılır.  $\lambda$  değerinin hesaplanmasında denklem 2.5 de belirtilen formüller kullanılır (Görçün, 2018).

$$E_i = \frac{d_i}{w_i} \quad \lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (2.5)$$

Uygulamamızdaki ana kriterler arası ikili karşılaştırma tutarlılık testi sonuçları Tablo 11'de verilmiştir.

**Tablo 11.** Tutarlılık Test Sonuçları (Consistency Results)

D sütun vektörü	E <sub>i</sub>
0,376867	3,003535
1,609825	3,015096
1,025287	3,010204
Lamda ( $\lambda$ )	3,009612

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{3,009612 - 3}{3 - 1} = 0,004806 \quad (2.6)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,004806}{1,24} = 0,003876 \quad (2.7)$$

CR= 0,003876 değeri 0,1 değerinden küçük olduğu için tutarlı değerlendirme yapıldığı anlaşılmıştır.

Yapılan ikili karşılaştırmalar ile elde edilen ana kriterlerin ağırlıkları (Tablo 6) sırasıyla 0,367, 0,206 ve 0,426 olarak belirlenmiştir. Ana kriterler içerisinde en fazla ağırlığa sahip kriter "toplanma alanı kapasitesi" dir. Onu 0,367 ile "ulaşılabilirlik" takip etmektedir. Alt kriter için ise (Tablo 8) 0,510 ile "yüksek yapılardan uzaklık" kriteri en yüksek öncelik vektörü değerine sahip kriter olarak görünmektedir. 1999 depremlerini yaşamış ve yapısal olarak büyük hasar almış olan Başiskele ilçesi için bu kriterin öncelikli olarak belirlenmesi oldukça normal bir sonuçtur. Çalışma alanı için belirlenmiş 35 toplanma alanından 25 adedinin bu kritere uygun alanlardan belirlenmiş olması ise oldukça sevindirici bir durumdur. Özellikle deprem söz konusu olduğunda afet sonrası kullanılmak için belirlenmiş alanlar panik, korku ve karmaşa nedeniyle daha uzun süreli olarak kullanılmaktadır. İnsanların bu alanları kullanma süreleri uzadıkça temel ihtiyaçlar ve mevsime bağlı ihtiyaçlar önem kazanmaktadır. Bu nedenle belirlenen bu alanların uygun altyapı şartlarına sahip olması beklenen bir durumdur. Bu çalışma sonuçlarına göre altyapı kriterlerine bağlı öncelik vektörü değeri (Tablo 10) 0,533 ile "su" kriteridir. Onu 0,340 ile WC kriterleri takip etmektedir. Başiskele ilçesi için su altyapısına sahip 27 (%77,14), WC altyapısına sahip 26 (%74,29) toplanma alanı mevcuttur.

## 6. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Olası büyük bir depremin hemen ardından evleri yıkılan, hasar gören veya korku ya da panik gibi sebeplere bağlı olarak evlerine giremeyen bireyler çoğu zaman afet anının sıcak saatlerde insanlarla bir arada bulunmayı tercih edecektir. Bir bölgeyi etkileyecek seviyede afetlere maruz kaldığı durumlarda ilgili kurumların afet risk yönetimi planlaması içerisinde daha önceden belirlemiş toplanma alanlarının bilinmesi ve kullanması gerekir. Ancak, bu alanların seçimi yerleşimin tamamlanmış olduğu bölgelerde çoğunlukla problem oluşturmaktadır.

Ülkemizde özellikle kentlerdeki yeşil alanlar konum ve büyüklük olarak çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Kocaeli gibi dağ-deniz mesafesinin dar olduğu kentlerde bu yetersizlik maalesef daha da ön plana çıkmaktadır. Kent yaşamının vazgeçilmez ihtiyaçlarından biri olan ve toplumun rekreasyona yönelik istek ve ihtiyaçlarını karşılayan bu yeşil alanlar afetler söz konusu olduğunda müdahale ve barınma ihtiyaçlarının karşılandığı alanlara dönüşmektedir. Açık yeşil alanların afet ve acil durumlar sonrası toplanma alanları olarak kullanıldığı düşünüldüğünde bu alanların uluslararası standartlara sahip ve gerekli donatılar ile fonksiyonel hale getirilmesi toplumun afetlere direncini arttıran önemli unsurlardan bir tanesi olacaktır.

Bu çalışmada, Kocaeli AFAD İl Müdürlüğü tarafından Başiskele ilçesi için uluslararası standartlara uygun olarak belirlenmeye çalışılmış 35 adet toplanma alanının yeterlikleri değerlendirilmiş ve olası bir afet sonrası insanları bir araya getirerek temel ihtiyaçların karşılanmasını sağlayacak olan bu alanların kriterleri ile oluşturulan hiyerarşik yapının uygunluğu AHP yöntemi ile hesaplanarak önceliklendirilmiştir. Buna göre ana kriterler arasında en fazla ağırlığa sahip olan "Toplanma alanı kapasitesi" kriteridir. Çalışmada değerlendirme alanı olarak seçilen Başiskele ilçesi toplanma alanlarının yeterlilik değerlendirmesi sonucunda;

- ✓ Kişi başına düşen alan büyüklüğü açısından toplanma alanlarının çoğunluğunun uygun olduğu görülmektedir. Toplam 22 mahallenin 17 adedi kişi başına 2m<sup>2</sup> nin üzerinde boş alana sahipken sadece 2 mahalle için 1m<sup>2</sup> nin altında uygunsuz alan görünmektedir. Bu mahalleler için alternatif toplanma alanlarının tespit edilmesi gerekmektedir.
- ✓ Başiskele ilçesindeki toplanma alanlarının büyük bir çoğunluğu denize (f=32, %91,43) ve yüksek yapılara uzak (f=25, %71,43) olarak belirlenmiştir.
- ✓ 35 adet toplanma alanının 24 (%68,57) adedi ana caddeye cephe iken 32 (%91,43) adedi yaya yoluna sahip durumdadır.

Bu değerlendirmeler doğrultusunda, Başiskele ilçesi için belirlenmiş toplanma alanlarının uluslararası kriterlere oldukça uygun olarak belirlendiğini söylemek mümkündür. Ancak kentsel alanlara artan ilgi nedeniyle bu alanların zamanla azalacağı unutulmamalı ve yüksek binalara yakın toplanma alanları için yeni alternatifler üretilmelidir.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Kocaeli İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü Planlama ve Zarar Azaltma Şube Müdürlüğü çalışanlarına "toplanma alanı kriterlerinin ağırlıklandırılması" çalışmasına sağladıkları katkıdan dolayı teşekkür ederiz.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- AFAD. 2019. Türkiye’de Afet Yönetimi ve Doğal Kaynaklı Afet İstatistikleri Raporu, Ankara.
- Aksoy, Y., Turan, A.Y., Atalay, H., 2009. İstanbul Fatih ilçesi yeşil alan yeterliliğinin Marmara depremi öncesi ve sonrası değerleri kullanılarak incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 14(2), 137-150.
- Aktaş, R., Doğanay, M. M. Gökmen, Y. Gazibey, Y. ve Türen, U., 2015. Sayısal Karar Verme Yöntemleri, İstanbul: Beta Yayınevi.
- Akyürek, Ö., Arslan, O., 2018. Kocaeli İli ve Çevresinde (1900-2016) Yılları Arasında Gerçekleşen Tarihsel Depremlerin Konumsal İstatistik Analizi. Journal of Geomatics, 3(1); 48-62.
- Birand, A. ve Ergünay, O., 2001. Türkiye’nin afet sorunlarına genel bakış ve Erzincan depremi uygulaması. İstanbul: Türkiye Deprem Vakfı.
- Çavuş, G., 2013. Deprem bölgelerindeki açık yeşil alan sistemi ilke ve standartlarının Bolu ili örneğinde irdelenmesi. Yayımlanmamış doktora tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çuvaş, N., 2002. İzmit Civarının Jeolojisi Ve Coğrafi Bilgi Sistemi. Yayımlanmamış yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü.
- Çınar, A.K., Akgün, Y. ve Maral, H., 2018. Afet sonrası acil toplanma ve geçici barınma alanlarının planlanmasındaki faktörlerin incelenmesi: İzmir-Karşıyaka örneği. Planlama 28(2), 179-200 doi: 10.14744/planlama.2018.07088.
- Çelik H.Z., Aydın, B.S., Partigöç, N.S., Erdin, H.E., 2018. Deprem riskleri bağlamında toplanma alanlarının güvenlik kriterleri temelinde değerlendirilmesi: Bayraklı (İzmir) örneği. 2nd. International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management 04-06 May.
- Çelikbilek Y., 2018. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri, Nobel Yayınevi, 2018.
- Çiçekdağı, H.İ. ve Kırış, Ş., 2012. Afet istasyonu ve toplanma merkezi için yer seçimi ve bir uygulama. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28, 67-76.
- Da Silva, J. ve Morera, B., 2014. City resilience framework. London: The Rockefeller Foundation.
- Demirci, A. ve Karakuyu, M., 2014. Afet yönetiminde coğrafi bilgi teknolojilerinin rolü. Doğu Coğrafya Dergisi, 12, 67-100.
- Erden T. ve Coşkun M. Z., 2010. Acil durum servislerinin yer seçimi: Analitik hiyerarşi yöntemi ve CBS entegrasyonu. İTÜ Dergisi, 9 (6), 37-50.
- Erdin, E., Kama, S., Metin, T.C., 2017. Afet ve acil durumlarda iletişim, koordinasyon ve mekanlar; Acil durum bilgisi ve yönetimine giriş. Bölüm: 7, Editör: Çabuk, S. N., Çabuk, A., Eskişehir.
- Erkan, M.A., Kılıç, G., Çamalan, G., Güser, Y., Çetin, S., Odabaşı, E., Soydam, M., Akgüngüz, A.S., Ayyacı, H., Eren, O., Arabacı, H., 2018. Meteorolojik karakterli doğal afetler 2017 yılı değerlendirmesi, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü.
- Gerdan, S. ve Şen A., 2019. Afet ve Acil Durumlar İçin Belirlenmiş Toplanma Alanlarının Yeterliklerinin Değerlendirilmesi: İzmit Örneği. İdealkent Dergisi. 10(28).
- Görçün Ö.F., 2018. Kent İçi Ulaşım Sistemlerine İlişkin Tercihlerin ve Tercihlere Etki Eden Faktörlerin Analitik Hiyerarşi Prosesi Yöntemi İle Değerlendirilmesi, Kent Akademisi, 11 (33).
- Gül, A. ve Küçük, V., 2001. Kentsel Açık-Yeşil Alanlar Ve Isparta Kenti Örneğinde İrdelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi Seri: A, Sayı: 2.
- Güvel, E.A., 2001. Doğal afetlerin politik ekonomisi. İstanbul: İstanbul Menkul Kıymetler Borsası Yayınları. 20-21,
- Hazırcı, M., Şahin, Y., 2019. Geçici İskân Alanlarının Seçimi İçin Ahp Temelli P-Medyan Modeli: Burdur Örneği. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(2), 403 – 417.
- JICA Japon Uluslararası İşbirliği Ajansı. 2002. Türkiye Cumhuriyeti İstanbul ili sismik mikro-bölgeleme dahil afet önleme/azaltma temel planı çalışması. İstanbul: Japon Uluslararası İşbirliği Ajansı ( JICA) ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB).
- Kadioğlu, M., 2008. Modern, Bütünleşik Afet Yönetiminin Temel İlkeleri; Kadioğlu, M. ve Özdamar, E., (editörler), “Afet Zararlarını Azaltmanın Temel İlkeleri”; s. 1-34, JICA Türkiye Ofisi Yayınları No: 2, Ankara.
- Kırçın, P.N., Çabuk, S.N., Aksoy, K., Çabuk, A., 2017. Ülkemizde yeşil alanların afet sonrası toplanma alanı olarak kullanılma olanaklarının artırılması üzerine bir araştırma, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-13 Ekim.
- Maral, H., Akgün, Y., Çınar, A.K. ve Karaveli, A.S., 2015. İzmir’deki afet sonrası toplanma ve acil barınma alanları üzerine bir değerlendirme, 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 14-16 Ekim.
- Press, F. ve Hamilton, M.,R., 1999. Mitigating natural disasters, Science, 284 (5422), 1927.
- Saaty, T.L., 1980. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation
- Saaty, T.L., 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, 48(1), 9-26.
- Saaty, T.L., 1994. How to make a decision: the analytic hierarchy process. Interfaces, 24(6), 19-43.
- Şahin, Y., Akyer, H., 2011. Ülke Kaynaklarının Verimli Kullanımı: 4x4 Arama ve Kurtarma Aracı Seçiminde AHS ve TOPSIS Yöntemlerinin Uygulanması. Vizyoner Dergisi, 3(5), 72-87.
- Tarabanis, K. ve Tsionas, I., 1999. Using network analysis for emergency planning in case of earthquake. Transactions in GIS, 3(2), 187-197.
- Yalçın Çal, D., Aydemir, E., 2018. Yerleşke içi acil durum toplanma yerlerinin belirlenmesi: Süleyman Demirel Üniversitesi örneği. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6(3).
- Yıldırım, B. F. ve Önder, E., 2018. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri, İstanbul: Dora Yayınevi.

- URL-1. Evac Services Web. , Assembly Area Requirements You Should Know, 01 Kasım 2018 tarihinde <https://www.evacservices.com.au/assembly-area-requirements/> adresinden erişildi.
- URL-2. City Fire Protection Web, Evacuation Procedures: Choosing your Assembly Point, <https://www.cityfire.co.uk/news/evacuation-procedures-choosing-your-assembly-point/> adresinden erişildi.
- URL-3. AFAD Web, Türkiye Afet Müdahale Planı [https://www.afad.gov.tr/upload/Node/2419/files/Afet\\_Mud\\_Pl\\_ResmiG\\_20122013.pdf](https://www.afad.gov.tr/upload/Node/2419/files/Afet_Mud_Pl_ResmiG_20122013.pdf) adresinden erişildi.
- URL-4 Resmi Gazete Web, E-Mevzuat, <https://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.19788&MevzuatIliski=0&sourceXmlSearch=mekan> adresinden erişildi.
- URL-5. Kocaeli AFAD Web, Kocaeli İl Afet Müdahale Planı [https://kocaeli.afad.gov.tr/upload/Node/17079/files/TAMP-KOCAELI\\_AFET\\_MUDAHALE\\_PLANI.pdf](https://kocaeli.afad.gov.tr/upload/Node/17079/files/TAMP-KOCAELI_AFET_MUDAHALE_PLANI.pdf) adresinden erişildi
- URL- 6. Kocaeli Büyükşehir Belediyesi- Başiskele İlçe Bilgileri <https://www.kocaeli.bel.tr/tr/main/pages/basiskele-ilcesi/203> adresinden erişildi.

**EK-1. Başiskele İlçesi Toplanma Alanları Altyapı Bilgileri (AFAD, 2019) (Infrastructure Information for Assembly Points of Basiskele District (AFAD, 2019))**

Alan No	Alan Adı	Mahalle	Cadde/Sokak	Ana Caddeye Cephe	Denize Uzaklık (>200m)	Yüksek Yapılardan Uzaklık (>30m)	Yaya Yolu	Engelli Yolu	Elektrik	Su	WC	Alan (m <sup>2</sup> )	Kapasite	Nüfus	Kişi Başına Alan (>2,5m <sup>2</sup> )
1	MİSAKİ MİLLİ İÖÖ.VE SAĞLIK TESİSİ ALANI	ALTINKENT T MAH.	29 EKİM CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	10.000	25.000	2680	3,73
2	DENİZDİBİ İLK VE ORTAOKULU	ATAKENT MAH.	ZÜBEYDE HANIM CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	8.000	20.000	3787	2,11
3	RECEP KARAASLAN PARKI	AYDINKENT T MAH.	EŞREF BİTLİS CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Yok	7.000	17.500	2580	2,71
4	BARBAROS İLK VE ORTAOKULU	BARBAROS MAH.	TURGUT ÖZAL CAD. YUNUS EMRE CAD.- BEYAZIT CAD.	Yok	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	24.730	61.825	9737	2,54
5	KARŞIYAKA ( SPOR TESİSİ ALANI )	BARBAROS MAH.	TURGUT ÖZAL CAD. YUNUS EMRE CAD.- BEYAZIT CAD.	Yok	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	24.730	61.825	9737	2,54
6	BAHÇECİK DAMLAR İLKOKULU	DAMLAR MAH.	MAHMUT ÇAVUŞ CAD. HACI ASLAN CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	8.000	20.000	2269	3,53
7	PARK ALANI	DAMLAR MAH.	MAHMUT ÇAVUŞ CAD. HACI ASLAN CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	8.000	20.000	2269	3,53
8	KARŞIYAKA AÇIK MEYDAN ALANI	DÖNGEL MAH.	DÜZLEM-SAĞDIÇ SOKAK	Yok	Evet	Evet	Var	Yok	Yok	Yok	Yok	2.775	6.938	2047	1,36
9	YUVACIK İLK VE ORTAOKULU	FATİH MAH.	BAHTIYAR SOK.	Var	Evet	Hayır	Var	Var	Var	Var	Var	1.500	3.750	6009	0,25
10	KULLAR VEZİRCİTLİĞİ O.O.V.İHSAN DEDE İÖÖ. KULLAR ( DÜZENLENMEMİŞ PARK ALANI)	KARADENİZLİLER MAH.	YONCALI SOK.	Var	Evet	Hayır	Var	Var	Var	Var	Var	13.282	33.205	2428	5,47
11	KULLAR ( DÜZENLENMEMİŞ PARK ALANI)	KARADENİZLİLER MAH.	KÖKLÜ SOK.	Yok	Evet	Evet	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	13.282	33.205	2428	5,47
12	BAHÇECİK ( SPOR TESİSİ ALANI)	KILIÇARSLAN MAH.	DÜZLÜK CAD. ZEYNEP ULTAVSK	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	14352	35880	2641	5,43
13	CUMHURİYET PARKI	KILIÇARSLAN MAH.	DÜZLÜK CAD. ZEYNEP ULTAVSK	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	14352	35880	2641	5,43
14	KÖRFEZ İLK VE ORTAOKULU	KÖRFEZ MAH.	D-130 KARAYOLU CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	2.000	5.000	2745	0,73
15	KARTONSAN İLK VE ORTAOKULU	KULLAR YAKACIK MAH.	ÖZEN SOK.	Yok	Evet	Hayır	Var	Var	Var	Var	Var	3.500	8.750	1705	2,05
16	PARK ALANI	MEHMETAGA MAH.	KARAMÜRSEL CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	4.000	10.000	1398	2,86
17	KULLAR ( AÇIK SPOR TESİSİ ALANI )	OVACIK MAH.	YENİ YOL CADDESİ	Yok	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	29.000	72.500	1160	25,00
18	KOÜ DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ YUVACIK ( SPOR TESİSİ ALANI )	PAŞADAĞ MAH.	SAĞLIK SOK. NURİ PAŞA CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	64.409	161.023	3391	18,99
19	YENİKÖY ( BOŞ PARK ALANI )	SEPETLİPİNAR MAH.	ZÜMRÜT SOKAK	Yok	Hayır	Evet	Var	Yok	Yok	Yok	Yok	4.500	11.250	1297	3,47
20	SEPETLİPİNAR İLK VE ORTAOKULU	SEPETLİPİNAR MAH.	ZÜMRÜT SOKAK	Yok	Hayır	Hayır	Var	Var	Var	Var	Var	4.500	11.250	1297	3,47
21	YUVACIK SERDAR İLKOKULU	SERDAR MAH.	S. GAFFAR OKKAN CAD. EMİR SULTAN CAD. - İSMAİL GAZİ SOK.	Var	Evet	Hayır	Var	Var	Var	Var	Var	17.390	43.475	7098	2,45
22	ORTAÖĞRETİM - KÜLTÜREL TEİSİ ALANI ( BOŞ )	SERDAR MAH.	S. GAFFAR OKKAN CAD. EMİR SULTAN CAD. - İSMAİL GAZİ SOK.	Yok	Evet	Evet	Var	Yok	Yok	Yok	Yok	17.390	43.475	7098	2,45
23	SEYMEEN 8.BORU İLKOKULU	SEYMEEN MAH.	D-130 KARAYOLU CAD. GÜNAYDIN CAD.	Var	Evet	Hayır	Var	Var	Var	Var	Var	10.983	27.458	4056	2,71
24	BAHÇECİK ( DÜZENLENMİŞ PARK ALANI)	SEYMEEN MAH.	GÜNAYDIN CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	10.983	27.458	4056	2,71
25	BAHÇECİK MES.VE TEK.AND.LİSESİ	SEYMEEN MAH.	GÜLBAHAR HATUN CD.	Var	Evet	Hayır	Var	Var	Var	Var	Var	10.983	27.458	4056	2,71
26	PARK ALANI	YAYLACIK MAH.	KARAMÜRSEL CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Yok	Yok	Yok	Yok	46.500	116.250	2465	18,86
27	KULLAR ( DÜZENLENMEMİŞ PARK ALANI)	YAYLACIK MAH.	TALİM SOK.	Yok	Hayır	Hayır	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	46.500	116.250	2465	18,86
28	YENİKÖY MERKEZ PARKI	YENİKÖY MAH.	CEVİZLİK CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	13.590	33.975	5010	2,71
29	YENİKÖY MERKEZ (KÜLTÜREL TEİSİ ALANI)	YENİKÖY MAH.	VATAN CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	13.590	33.975	5010	2,71
30	YEŞİLKENT İLK VE ORTAOKULU	YEŞİLKENT MAH.	MANZARA CAD.	Var	Evet	Hayır	Var	Var	Var	Var	Var	4.800	12.000	3110	1,54
31	YUVACIK (BOŞ PARK ALANI)	YEŞİLYURT MAH.	ARAS SOK.	Yok	Evet	Evet	Var	Yok	Yok	Yok	Yok	11.687	29.218	8776	1,33
32	YUVACIK ( BOŞ PARK ALANI)	YEŞİLYURT MAH.	HAFİZ BAYRAM SOK. - ER SOK.	Var	Evet	Hayır	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	11.687	29.218	8776	1,33
33	LEVENT KIRCA İÖ.VE OYA BAŞAR O.O	YUVACIK MAH.	LEVENT KIRCA CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	12.712	31.780	1390	9,15
34	YAKACIK PARKI	YUVACIK MAH.	HACI MAHMUT CAD.	Var	Evet	Evet	Var	Var	Var	Var	Var	12.712	31.780	1390	9,15



## ÇELİK TAHİL DEPOLAMA SİLOLARININ SİSMİK ANALİZİ ÜZERİNE GENEL BİR DEĞERLENDİRME VE YENİ ANALİZ YAKLAŞIMLARI

Ali İhsan ÇELİK<sup>1\*</sup>, Mehmet Metin KÖSE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kayseri Üniversitesi, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Meslek Yüksekokulu, İnşaat bölümü, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup> K. Maraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, K.Maraş, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
Silo, Sismik Analiz, Ayrık Elemanlar Metodu, Sonlu Elemanlar Metodu.	Tahıl depolama silolarının önemi tarımsal endüstrinin ihtiyacını karşılamak için her geçen gün artmaktadır. Bu silolarda; buğday, arpa, yulaf, mısır, pirinç ve benzeri temel gıda maddeleri depolanmaktadır. Sismik bölgelerde inşa edilen tahıl depolama siloları, inşaat mühendisliğinin ilgisini çekmektedir. Sismik kaynaklı basınçlar altında özellikle ince cidarlı siloların, cidarlarında kritik burkulmalar ve patlamalar meydana gelebilmektedir. Bu çalışma öncelikle silolar hakkında önemli sismik analizlerin genel değerlendirmesini içermekle birlikte, yeni tasarım yaklaşımlarını da sunmaktadır. Tahıl depolama silolarının sismik analizlerinin doğru yapılması, meydana gelebilecek hasarların önlenmesine doğrudan katkı sağlayacaktır. Silo içindeki tahıllar; statik basınçlarının yanı sıra, sismik hareket sırasında taneciklerin kendi aralarında ve silo cidarında oluşturdukları sürtünmelerden dolayı farklı dinamik basınçlara sebep olmaktadır. Silo ve içeriği zemin ivmesine maruz kaldığında, partiküllerde ve silo duvarında sert davranışlar meydana gelmektedir. Sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizlerde taneciklerin yatay ve dikey ivmelenmeye bağlı hareketlerinin simüle edilerek silo cidarında oluşacak gerilmelerin ve burkulmaların gözlemlenmesi gerekir. Literatürdeki sonlu elemanlar analizlerinde, silo içindeki tanecikler arası boşluklar ve sıkıştırma oranlarının simülasyonunda eksiklikler vardır. Silo içindeki tahıl taneciklerinin gerçeğe uygun bir şekilde, yani parçacıklı dökme malzeme (bulk material) olarak simüle edilmesi gerekir. Simülasyonların ve analizlerin gerçeğe uygunluğunu sağlamak için ayrık elemanlar metodu ile sonlu elemanlar metodunun birlikte kullanılması yeni bir yaklaşım olarak önerilmektedir.

## A GENERAL EVALUATION AND NEW ANALYSIS APPROACHES ON SEISMIC ANALYSIS OF STEEL GRAIN STORAGE SILOS

Keywords	Abstract
Silo, Seismic Analysis, Discrete Element Method, Finite Element Method.	The importance of grain storage silos is increasing day by day to satisfy the needs of the agricultural industry. In these silos; wheat, barley, oats, corn, rice, and similar basic foodstuffs are stored. Grain storage silos built in seismic regions attract the attention of civil engineering. Critical buckling and explosions may occur in the walls of thin-walled silos, especially under seismic source pressures. This study primarily includes an overview of important seismic analyzes about silos, but also presents new design approaches. Correct seismic analysis of grain storage silos will directly contribute to the prevention of possible damages. Cereals in the silo; Besides their static pressures, they cause different dynamic pressures due to the friction created by the particles among themselves and in the silo wall during seismic motion. When the silo and its contents are exposed to ground acceleration, harsh behavior occurs in the particles and the silo wall. In the analysis made with the finite element method, the movements of the particles due to horizontal and vertical acceleration should be simulated and the stresses and buckling in the silo wall should be observed. There are deficiencies in the finite element analysis in the literature, the intergranular gaps in the silo and the simulation of compression ratios. Grain particles in the silo must be simulated in a realistic way, ie as bulk material. It is

\* İlgili yazar / Corresponding author: acelik@kayseri.edu.tr, +90-5332217635

proposed as a new approach to use the discrete elements method and the finite elements method to ensure that the simulations and analyzes are rational.

#### Alıntı / Cite

Çelik, A. İ, Köse, M.M., (2020). Çelik Tahıl Depolama Silolarının Sismik Analizi Üzerine Genel Bir Değerlendirme ve Yeni Analiz Yaklaşımları, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 501-520.

#### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A.İ. Çelik, 0000-0001-7233-7647  
M.M. Köse, 0000-0002-7462-1577

#### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	05.02.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	15.04.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	19.04.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

## 1. Giriş (Introduction)

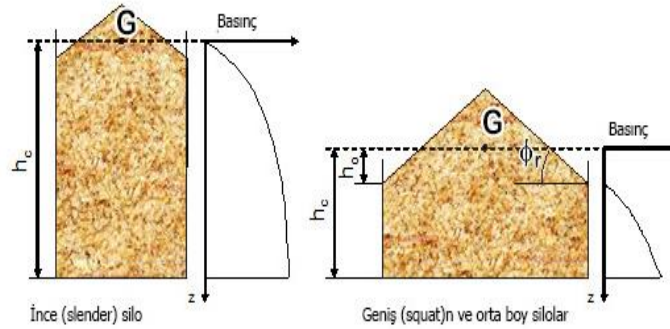
Çelik depolama siloları, betonarme depolardan farklı olarak hafif olmaları, kolay kurulmaları, sökülmeleri, taşınmaları, tadilatları v.b özellikleri nedeniyle, büyük miktarlardaki dökme malzemelerin (bulk materials) kısa ve uzun süreli depolanması için daha elverişlidirler. Tahıl depolama için elverişli olmaları kullanımlarını her geçen gün artırmaktadır. Son yıllarda madencilik, kimyasal, tarım ve gıda işleme dâhil olmak üzere birçok sektörde artan bir şekilde kullanılmaktadırlar. Dökme malzeme (bulk material) içeren çelik yapılar genel olarak silo, ambar, depo ve tank olarak isimlendirilmektedirler. Bu çalışmada, silo ifadesi genel tahıl deposu anlamında kullanılacaktır. Dünyanın en etkili deprem kuşaklarından biride ülkemizde bulunmaktadır. Geçmişte meydana gelen birçok yıkıcı deprem büyük hasarlara sebep oldu. Önlem alınmadığı takdirde gelecekte de ciddi hasarlara sebep olacaktır (Demir & Saltan, 2017). Yıkıcı depremler esnasında tahıl depolama silolarında da çeşitli hasarlar ve burkulmalar meydana gelmektedir. Bu ince cidarlı çelik yapıların, sismik tasarım problemlerindeki karmaşıklığı azaltmak için mevcut bilginin pratik kullanımına ve daha ileri araştırma ihtiyaçlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına ihtiyaç vardır. Siloların sismik tasarımı ve analizi, çeşitli standartlar ve önerilen uygulamalar tarafından yönetilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde, ANSI / ASAE EP433 mühendislik uygulaması, serbest akan tahılları depolamak için kullanılan merkezi olarak yüklenmiş ve boşaltılan silolardaki tane basınçlarını tahmin etme yöntemlerini sunmaktadır. Avrupa'da, EN 1991-4 Eurocode 1: Actions on structures—Part 4: Silos and Tanks; Avrupa birliği ülkeleri tarafından kullanılması zorunlu bir standarttır. AS 3774—1996, Australian Standard Loads on bulk solids containers kullanıcılar, taneler, silolar, depolar ve döküm hunileri de dahil olmak üzere, granül dökme malzemelerin depolanması için, depolama silolarının tasarımı ve yüklerin belirlenmesi için ulusal olarak kabul edilebilir kurallar sunmaktadır(ANSI/ASAE EP433 DEC (R2011)Loads Exerted by Free-Flowing Grain on Bins; A. Standard, 1996; B. Standard, 2006)., Bu standartlar arasında farklılıklar bulunmaktadır. Ayrıca, pek çok ortak silo tasarım koşulu, bunların hiçbiri tarafından tam olarak karşılanamamaktadır (Carson & Craig, 2015). Sismik tasarım hükümleri dışında, analitik formülasyon, deneysel yaklaşım ve sonlu elemanlar yöntemi gibi farklı sismik analiz yöntemleri de bulunmaktadır.

Deprem esnasında, siloların çeperleri tipik olarak silo içindeki partikül materyali tarafından üretilen hem normal hem de kayma gerilmelerine (normal basınçlar, dikey ve yatay sürtünme kuvvetleri) maruz kalırlar. Normal basınç ve kayma sürtünme kuvvetlerinin büyüklüğü ve dağılımı çeperin yüksekliği, içindeki malzemenin özelliklerine ve silonun doldurulup doldurulmadığına bağlıdır. Yanal yüklerin etkisi özellikle daha ağır malzemeler içeren ve daha büyük silolar üzerinde önemli olabilmektedir, çünkü yatay sismik yükün büyüklüğü silo ağırlığıyla doğrudan orantılıdır (Dogangun, Karaca, Durmus, & Sezen, 2009). Deprem sırasında, tanecikli dökme malzeme silo içinde salınabileceğinden, malzeme akışından kaynaklanan yanal yükler ile yanal sismik yükler aynı anda dikkate alınmalıdır.

Roberts tarafından, (1882) yılında yapılan bir çalışmada, dökme malzemeleri içeren siloların statik durumdaki yatay ve düşey basınçları belirlenmiştir (Rotter & Hull, 1989). Roberts (1884), depolanan malzemelerin ağırlığının sürtünmeyle duvarlara aktarıldığını ve duvarlardaki yatay ve dikey basınçların eşit olmadığını ortaya çıkarmıştır (Li, 1994). Daha sonra siloların statik tasarımı, Pozzati ve Ceccoli (1972), Janssen (1895) ve Koenen (1896) tarafından, silo duvarları ile etkileşime giren tane kütlelerinin bir kısmının tanımlanmasına yol açan fiziksel idealleşmeye uygun olarak yapılması önerilmiştir. Statik koşullarda, daha ayrıntılı olarak, Janssen ve Koenen yukarıda belirtilen etkileşimli kütleli, koruma durumunda, tahıl kütlelerinin bir kısmının tamamen sürdürülmesini sağlayan, tahılın duvara temas yüzeyi boyunca sürtünmeli dikey gerilmelerin tam olarak duvarlar tarafından sömürülmesi ile temsil edilen çalışmayı yapmışlardır (Janssen, 1895; Koenen, 1896; Pozzati & Ceccoli, 1972). Bu idealizasyon, sürtünmeli dikey gerilmelerin tam olarak kullanılması nedeniyle, silo duvarlarında tahıl benzeri malzemenin sebep olduğu eylemler için bir üst sınıra karşılık geldiğinden daha emniyetlidir. Eurocode 1 Part 4 hükümleri (EN 1991-4 2004) bu yaklaşıma dayanmaktadır.

Son yıllarda siloların sismik performanslarını belirlemek için birçok araştırma yapılmaktadır. Bu araştırmalarda siloların sismik davranışlarının tam olarak anlaşılması vurgulanmaktadır. Siloların sismik analizi çok karmaşık

olduğundan, kullanılan dökme malzemelerin özellikleri ve dökme malzemelerin silo çeperi ile nasıl etkileşime girdiği gibi çeşitli parametrelerin ayrıntılı olarak değerlendirilmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır. İki eleman arasındaki temas, yük aktarma tekniği açısından iki ya da daha fazla temas yüzeyi arasındaki ilişkinin yapısına bağlıdır. Temas durumunun doğrudan incelenmesi ve kesin bir şekilde değerlerin ölçülmesi oldukça zordur. Temas problemi temas gerilmelerini oluşturan elemanların davranışının, malzeme özelliklerine bağlı olmasından dolayı karmaşıktır (Yaylacı & Terzi, 2018). Silvestri ve arkadaşlarının (2012) yaptıkları çalışmalar bu alana önemli katkılar sağlamıştır. Çalışmalarında, tahılların deprem sırasındaki etkin davranışlarının değerlendirilmesinde analitik çözümler sunmuşlardır. Etkili kütle (yani, silo duvarına dinamik uyarım altında yatay olarak iten kütle), özellikle geniş ve kısa (squat) bir geometri ile karakterize edilen silolar için Eurocode 8 tarafından verileden çok daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir (Silvestri, Gasparini, Trombetti, & Foti, 2012). Pieraccini ve vd., (2015) Silvestri'nin teorisini geliştirmiş ve revize ederek yeni sonuçlar ortaya çıkarmışlardır (Pieraccini, Silvestri, & Trombetti, 2015). Silvestri ve vd., (2016), önerilen analitik formülasyonları doğrulamak için bir dizi sarsma masası testi gerçekleştirmişlerdir (Silvestri ve vd., 2016). Livaoglu ve Durmuş (2015), düztabanlı yerden destekli silolardaki dinamik malzeme basınçlarını ve boyutlarını tahmin etmek için basitleştirilmiş bir sismik analiz prosedürü kullanmışlar. Hem geniş hem de Narin bir silo kullanarak yapmış oldukları çalışmadan elde edilen sonuçlar, EN1998-4 ile elde edilen bulgularla karşılaştırmışlardır. Önerilen analitik modelin, özellikle dinamik malzeme basıncının analizi açısından iyi bir sonuç sağladığı fikrine varılmıştır. Eurocode'da önerilen analitik yöntemi kullanarak, geniş siloları için dinamik malzeme basıncının hafife alınabileceğini, ancak Narin silolar için dinamik malzeme basıncının daha etkili olduğunu belirtmişler (Livaoglu & Durmuş, 2016). Butenweg ve vd., iki farklı silo analiz yöntemini karşılaştırmışlardır. İlk yol, sismik yükleme ile duvara etki eden statik eşdeğer yüklerin modellenmesidir, diğeri ise, duvar ve granül dökme malzeme arasındaki etkileşimin neden olduğu doğrusal olmayan olayların dikkate alındığı bir zaman geçmişi (time history) analizidir. Karşılaştırma sonucunda, statik eşdeğer yükler için doğrusal olmayan bir simülasyon modeliyle ve geniş silonun, statik eşdeğer yüklere sahip yaklaşımında, alt güvenlik sınırından daha yüksek sonuçlarla varılmıştır. Bunun nedeni, yük yaklaşımında geniş bir silo söz konusu olduğunda, gerilmenin büyük bir kısmının, dökme malzemenin sürtünmesiyle doğrudan giderildiği gerçeğini yeterli hassasiyette modellenememesindedir (Butenweg, Rosin, & Holler, 2017). Narin ve geniş olarak ifade edilen silolara ait temsili görseller Şekil 1. de sunulmuştur.



Şekil 1. Narin ve Geniş silolar (Slender and Squat silos)

Mehretehran ve Maleki (2018), tabanda yatay uyarımlara maruz kalan çelik siloların dinamik burkulma davranışını incelemek için farklı boy oranlarına sahip üç siloyu kullanarak Elastik-plastik burkulma direncini, Artımlı Dinamik Analizler (IDA) kullanarak tahmin yürütmüşlerdir. Buna göre, burkulma anında kritik taban kesme, taban momenti ve tepe yer ivmesi (PGA) hesaplanmıştır. Üstelik silo duvarlarındaki dökme katı maddelerden (bulk material) kaynaklanan ilave normal basınçlar, Eurocode 8 ile değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Narin siloların, burkulma başarısızlığına karşı daha savunmasız olduklarını, buna karşılık geniş siloların, aynı sismik koşullar altında önemli ölçüde daha yüksek bir direnci temsil ettiğini göstermiştir (Mehretehran & Maleki, 2018). Siloların güvenliği kadar ekonomikliği de önemlidir. İnce cidarlı silolar daha ekonomik olduğundan firmaların tercih ettiği bir tasarım modelidir, dolayısıyla deprem yer hareketine karşı bu siloların performanslarının artırılması gerekir. Braun ve Eibl (1998)'e göre, deprem yüklemesine maruz kalan siloda simetrik olmayan basınç dağılımları meydana gelir ve cidarlarda ovalleşmeler oluşur (Braun & Eibl, 2009). Rotter (2001), simetrik olmayan basınçlar sadece lokal burkulma sebepleriyle oluşmaz, aynı zamanda tüm siloyu membran gerilmeleri ile de etkilediğini ifade etmiştir (Rotter, 2001). Kanyılmaz ve Castiglioni (2017)'nin güncel çalışmasında, son yıllarda siloların birçoğunun depremler nedeniyle zarar gördüğünü ortaya çıkarılmışlardır. Gerçekten de, yüksek sismisite riskine sahip bölgelerde inşa edilen sanayi tesislerinin çoğunda bulunan siloların, sismik tasarım kodlarının son güncellemelerinden önce tasarlanmış ve üretilmiş olmalarından dolayı, bu yapıların mevcut sismik güvenilirlikleri tartışmalıdır. Standart dışı yapıların çökmesinin neden olabileceği ekonomik, yaşamsal ve çevresel sorunlardan kaçınmak için, spesifik iyileştirme çözümleri geliştirilmeli ve acilen uygulanmalıdır. Onlar, çalışmalarında sismik izolasyon çözümünün uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Hatta, mevcut bir sanayi kuruluşunda sismik savunmasızlığa sahip çelik silo



sistemini araştırmışlar ve kavisli yüzeyi tek kaymalı sarkaç cihazlarından yararlanılarak bir iyileştirme çözümü önermişlerdir. Özgün dinamik analiz yöntemi, orijinal ve güçlendirme çözümlerin performanslarını karşılaştırmak için kullanılmıştır. Sismik izolasyon çözümlerinin yapısal yararları, elastik olmayan deformasyonlar, taban kesme, katlı ötelemeler ve izolatör deplasmanları açısından ölçülmüştür. Orijinal yapının sismik davranışı ve güçlendirilmiş yapısı kırılma eğrileriyle karşılaştırılmıştır (Kanyılmaz & Castiglioni, 2017).

Silindirik çelik depolama tankları endüstrileşmenin başlangıcından beri sıvı türü maddeleri depolamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Dolayısıyla şimdiye kadar meydana gelen depremlerde, sıvı içeren çelik depoların hasarları araştırmacılar tarafından çokça gözlemlenmiş ve çeşitli sismik analizler yapılmıştır (Çelik, Köse, Akgül, & Apay, 2019). Diğer yandan, siloların tarımsal ürün depolamada kullanılması daha yakın zamanlara dayanmaktadır ve hızla yaygınlaşmaktadır. Özellikle deprem tehlikesi yüksek olan bölgelerde bulunan siloların büyük çoğunluğu, tahıl ve tahıl ürünlerini depolamak için kullanıldığından, güvenliklerinin sağlanması büyük önem arz etmektedir. Her ne kadar bu siloların tasarım ve imalat standartları varsa da bu tasarım kodları daha çok tahılların doldurulması, tahliyesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Diğer taraftan, tahıl depolama silolarının yapısal davranışını anlamak için şimdiye kadar yapılan araştırmalara göre, her yıl, kötü tasarım ve kötü inşaat nedeniyle diğer yapılardan daha fazla sayıda silo çökmektedir. Mesela, Taichung Limanı'ndaki siloların tamamı, merkez üssünden 70 km uzaklıktaki 1999 Chi-Chi, Tayvan depremi sırasında çökmüştür (Şekil 2.).



Şekil 2. Çelik silolarının çökmesi (Collapse of Silos)

En son 2011 de meydana gelen Van depreminde tarımsal endüstri alanında özellikle yükseltilmiş siloların çoğu kötü tasarım nedeniyle çökmüştür. Bu tür tesislerin tasarımı ve yapımı için kullanılan sismik uygulama tasarımlarında büyük revizyonlara ihtiyaç duyulduğu açıkça görülmektedir. Araştırmalar, tasarım prosedürlerinin yetersiz olduğunu ve bu nedenle silo yapılarının yapısal davranışı bilgisinde önemli gelişmelerin hala gerekli olduğunu göstermektedir.

Siloların sismik tasarımı için en geçerli Eurocode 8 hükümleri (2006) Younan ve Veletsos (1998) tarafından önerilen ve analitik formülasyon metoduna ve sadece kaba sert arayüzlü silo duvarını göz önüne alarak çalışma yürüten Rotter ve Hull (1989) çalışmasına dayanmaktadır. Silvestri tarafından yakın zamanda önerilen formülasyon tekniği de yetersiz kalmıştır. Daha sonra Silvestri teorisi olarak bilinen, Janssen ve Koenen tarafından statik durum olarak tanımlanan ve eksenel simetri eksikliğinden kaynaklanan sorunların üstesinden gelmek için Pieraccin ve vd. (2015) tarafından modifiye edilerek yeni bir fiziksel model geliştirilmiştir. Bu modelden sonra, Pieraccin ve Silvestri, tahıl depolama silolarıyla ilgili tasarım hükümlerinin yetersiz olduğunu ve hala detaylı saha araştırmalarına ihtiyaç duyulduğunu ifade etmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında, şimdiye kadar yapılmış önemli saha araştırmaları kronolojik bir bakışla özetlenmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalara göre siloların sismik tasarımında hala önemli eksiklikler olduğu vurgulanmaktadır. Silo tasarımında en çok başvurulan Eurocode-8, Silvestri ve vd., çalışmasına dayandığı için orada da yetersizlikler söz konusudur. Buradan yola çıkarak, gelecekte bu alandaki eksikliklerin giderilmesi için öncelikle, deneysel çalışmaların 6 eksenli sismik sarsma tablası ile yapılması tavsiye edilmektedir. İkinci olarak, yapısal mekanik analizlerde sıklıkla başvurulan sonlu elemanlar metodunun, ayırık elemanlar metodu ile birlikte kullanılması önerilmektedir. Tanecikli dökme malzeme içeren siloların sismik tasarımında, yeni modelleme teknikleri saha araştırmalarına önemli katkılar sağlayacaktır. Literatürde de sıklıkla bahsedilen silo içindeki tanecikli dinamik kütlelerin modellenmesi, yeni teknoloji yazılımlarla daha gerçekçi simülasyonlar ve analizler yapılabilir. EDEM yazılımı DEM (discreet element method) yani ayırık elemanlar metodunu kullanarak tanecikli dökme malzemeleri dinamik şartlara uygun olarak modelleyebilmektedir. Buradan, silo içindeki tahılların EDEM yazılımı ile modellenmesi ve ANSYS Workbench' teki silo içine EDEM for ANSYS aracı ile analiz verilerinin çekilerek sonlu elemanlar metodu ile sonuçları gözlemlenmek daha gerçekçi olacaktır. Çünkü sismik hareket esnasında, tana-

tane, tane-duvar etkileşimi ve aynı zamanda tanecikler arasındaki boşlukların silo burkulmasında en etkili parametrelerdendir. Bu parametrelerin mekanik özelliklerinin doğru belirlenmesi ve doğru modellenmesi ayırık elemanlar metodu ile mümkündür. Bu modelleme sonlu elemanlar metodu ile birlikte kullanılması, analizlerin çok yönlü ele alınmasını sağlayacaktır. Buradan yola çıkarak bu çalışma sonucunda, ayırık elemanlar metodu ile sonlu elemanlar metodunun birlikte kullanılması ile ilgili örnek bir çalışma yapılmıştır. Önerilen bu yeni yaklaşımlar, yeni projelerle desteklenmesi, önemini ortaya çıkaracak ve daha hızlı sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.

## 2. Siloların Sismik Davranışı (Seismic Behavior of Silos)

Deprem hareketi, yapı üzerinde herhangi bir yatay yönü etkileyebilecek şekilde yanal kuvvetlere neden olur. Deprem bölgelerinde inşa edilen tüm yapılar bu yanal kuvvetlere dayanacak şekilde tasarlanması gerekir. Deprem kuvvetlerinin değerlendirilmesi zordur ve ilgili bölgelerde uzun süreli gözlem gerektirir. Deprem sırasında yapı, temellerinin hareketleri tarafından uygulanan zorlamalı titreşimlere maruz kalır. Yapının ataleti, temel hareketlerine direnme eğilimindedir. Bu nedenle, temel olarak, deprem esnasında bir kesme kuvveti (base shear) oluşacaktır. Bu güç şuna eşittir; deprem sırasındaki boş olan silindirik çelik yapılarda Şekil 3'de görüldüğü gibi, yanal bir kuvvet (F) yapının ağırlık merkezinde yatay olarak hareket eder ve temelin ters yönünde eşit bir kayma yapar. Deprem kuvveti aşağıdaki formül ile kolayca hesaplanabilir.

$$F = W * \frac{a}{g} \quad (1)$$

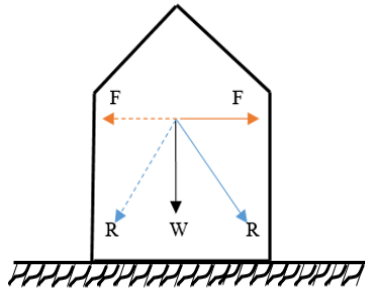
F = Deprem Kuvveti ( base shear )

W = Yapının ağırlığı

a = Deprem ivmesi

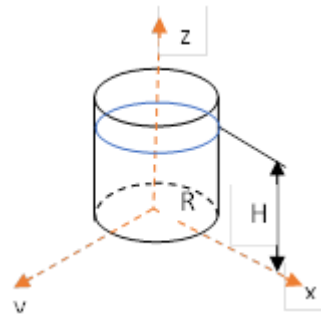
g = Yerçekimi kuvveti

$\frac{a}{g}$  = Sismik faktör



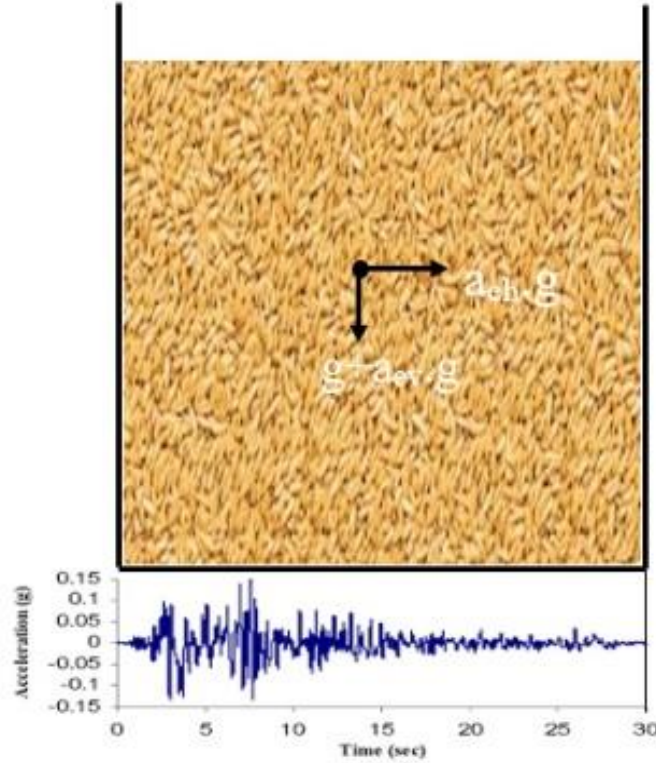
Şekil 3. Deprem esnasında sismik yapı (Seismic structure during the earthquake)

Öte yandan, silo tahıl tanecikli malzemeyle doluyken, deprem esnasındaki dinamik davranışları çok karmaşık yapıya bürünüyor. Yarıçapı R olan ve H yüksekliğine kadar tane benzeri materyalle doldurulmuş Şekil 4. teki gibi düztabanlı bir tahıl silosunun geometrisi ve referans sistemi benimsenmiştir. Burada, tanenin serbest yüzeyinin yatay olduğu varsayılır.



Şekil 4. Düztabanlı tahıl silosunun geometrisi ve referans sistemi (Geometry and reference system of flat bottom grain silo)

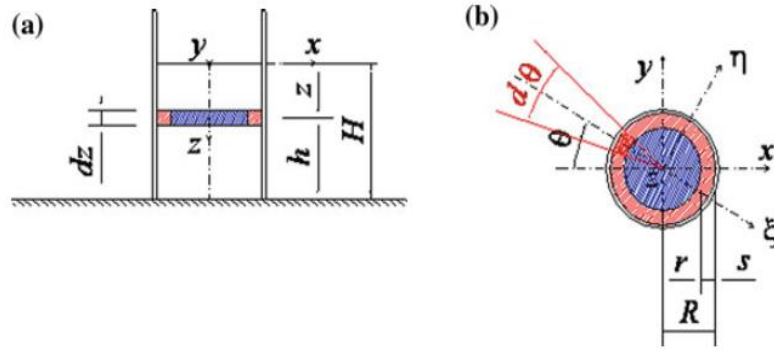
Tahıl benzeri malzemelerin deprem ivmesi nedeniyle silo duvarlarında ürettiği basınçların yaklaşık bir tahminini elde etmek amacıyla idealize edilmiş bir sistem kullanılır. Buna göre, Şekil 5'te iç diskin ve dış simidin boyutları, tahılın serbest yüzeyinden ölçülen  $z$  mesafesine göre belirlendiği için dış simidin kalınlığı ( $s$ ),  $z$  tarafından değişir. İç disk  $D$ , bir  $d_z$  yüksekliği ve bir yarıçap  $r(z) = R-s(z)$  ile tanımlanır ve tahılın serbest yüzeyinden ölçülen  $z$  derinliğine, yani zeminden  $h = H-z$  yüksekliğine kadar ölçüldüğü varsayılmaktadır. Dış simit, her biri merkez açısı  $d\theta$  olan sektörlere (daireSEL halka şeklinde) alt bölümlere ayrılmıştır, Şekil 4.'de belirtildiği gibi,  $x$ 'in negatif yarı ekseninden saat yönünde ölçülen merkezi açı  $\theta$  ile tanımlanır. Dış simidin her kesimi, bir  $d_z$  yüksekliği ve  $s(z)$  kalınlığı ile karakterize edilir. Yatay düzlemde bir yardımcı koordinat sistemi ( $O, \xi-\eta$ ) de tanımlanmıştır, burada  $\xi$  radyal yönü (silonun yan yüzeyine dik) ve  $\eta$ , Şekil 4'te gösterildiği gibi  $\xi$  ile dik yönü temsil eder. Yukarıda tarif edilen idealize edilmiş sistem, Şekil 5'te Silvestri ve vd. tarafından, idealize edilmiş koşullarda incelenmiştir. Deprem yer hareketi, genel olarak  $t$  zamanının ve  $h$  yüksekliğinin (veya eşdeğer olarak, Şekil 5'de gösterildiği gibi, tahılın serbest yüzeyinden  $z$  mesafesinin) zamanın bir fonksiyonu olarak dikey ve yatay ivmelenmelerle simüle edilir.



Şekil 5. İvmelenmiş koşullarda: silo  $g+a_{ev}.g$  ve  $a_{eh}.g$  maruz kalır (In accelerated conditions: silo  $g+a_{ev}.g$  and  $a_{eh}.g$  are exposed)

Şekil 6.'da düşey doğrultu söz konusu olduğunda, silonun ve içeriğinin yaşadığı mutlak ivmelenme,  $a_v(t, z) = g + a_{ev}(t, z) \cdot g$ , olarak verilir,  $g$  burada yerçekimi ivmesidir ve  $a_{ev}(t, z) \cdot g$ , depremden kaynaklanan ek dikey ivmelenme olarak verilir. Yatay doğrultuda, mutlak ivme  $a_h(t, z) = a_{eh}(t, z) \cdot g$ , burada,  $a_{eh}(t, z) \cdot g$ , depremden kaynaklanan yatay ivmedir. Hem  $a_{ev}$  hem de  $a_e, g$ 'nin fraksiyonları olarak ifade edilir. Karşılaştırmalı amaçlar için, Eurocode 8 Part 4 §3.3 (EN 1998-4 2006),  $a_e(t, z)$  parametresine  $a(z)$  olarak atıfta bulunur; bu, silonun depolanan içeriğin eşdeğer yüzeyinden dikey bir mesafedeki  $z$  yatay tepkisine oranının yerçekimi ivmesine oranı olarak tanımlanır.

Deprem girdisindeki zamanın değişimi söz konusu olduğunda, deprem yer hareketi zamanı( $t$ ) sabit dikey ve yatay ivme ile simüle edilir:  $a_{ev}(t, z) = a_{ev}(z)$  ve  $a_{eh}(t, z) = a_{eh}(z)$ . Bu varsayımın, hem dikey hem de yatay ivmelerin eşzamanlı olarak en yüksek değerlerine ulaşması gerektiğini kurgusal bir zaman dilimini temsil ettiği düşünüldüğünde, daha güvenli ve basitleştirmeye yol açtığı açıktır. Aynı varsayım, zamanın bir fonksiyonu olmayan  $\alpha(z)$  parametresi ile Eurocode 8 Part 4 §3.3 (EN 1998-4 2006) tarafından da kabul edilmiştir.



Şekil 6. Tanenin dış simidi (kırmızı tarama) ve iç diski (mavi tarama), dikey bölüm, b planı görünümü (Outer wheel of the grain (red hatching) and inner disk (blue hatching), vertical section, plan b view)

### 3. Düztabanlı Siloların Sismik Tasarım Teorisi ve Tasarım Hükümleri Detayı (Detail of Seismic Design Theory and Design Provisions of Flat Bottom Silos)

Türkiye’de en yaygın kullanılan silo tipi, yerden destekli düztabanlı tahıl depolama silolarıdır. Buradan yola çıkarak, özellikle düztabanlı silolar hakkında yapılmış teorik çalışmalar ve tasarım hükümlerinin genel değerlendirilmesi bu bölümde detaylandırılmaktadır.

#### 3.1. Janssen (1895) ve Koenen (1896) Teorisi (Janssen (1895) and Koenen (1896) Teory)

Tahıl benzeri malzeme içeren siloların duvarlarındaki dikey ve yatay basınçların gerçek dağılımını tahmin etmeyi amaçlayan ilk model, on dokuzuncu yüzyılın sonlarında Janssen (1895) ve Koenen (1896) tarafından yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Duvara yaslanan etkili tahıl kütlelerini değerlendirmek ve statik durum için güvenli tasarım göstergeleri sağlamak amacıyla, tahıl içermeyen yüzeyden,  $p_v(z)$  'e kadar olan normal bir mesafedeki dikey tane-tane basıncı kabul edilir. Bu varsayım, duvardaki yatay ve dikey kuvvetlerin aksel-simetrik dağılımına yol açar. Janssen denklemleri, uzun zamandır duvardaki normal basınçların, düşey basınçların ve akış sırasındaki değerlerin tahmin edilebileceği duvardaki sürtünme kuvvetlerinin hesaplanmasında uygun bir araç olarak kullanılmıştır. Silo duvarındaki yüklerin tasarım değerleri böylece, akış yükü çarpanları veya Janssen basınçlarına uygulanan aşırı basınç faktörleri kullanılarak elde edilir.

$$P_o(Z) = \lambda \cdot P_v(Z) \quad (2)$$

$$\tau_o(Z) = \mu_{GW}(Z) \cdot P_o(Z) \quad (3)$$

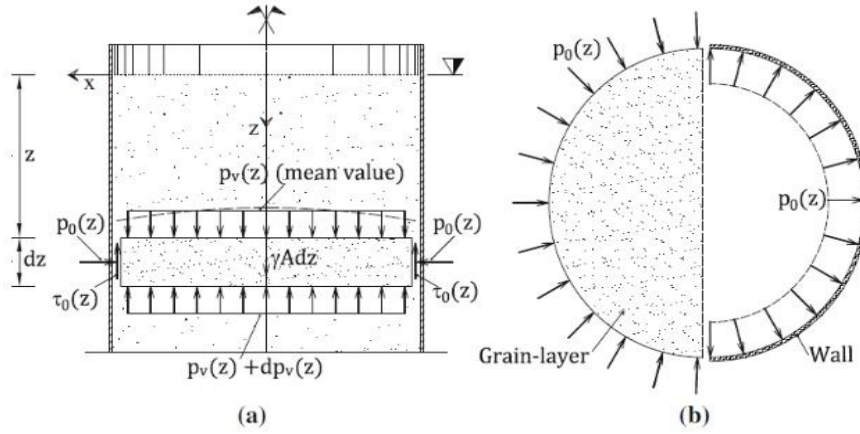
Burada,  $P_o(Z)$  normal yatay basınç,  $\lambda$  basınç oranını (yatay ve düşey basınçlar arasında),  $\tau_o(Z)$  düşey sürtünme gerilimini ve  $\mu_{GW}$  tane-duvar sürtünme katsayısını ifade ediyor. Temel bir tahıl tabakasının düşey kuvvet dengesi dikkate alındığında (birinci mertebeden diferansiyel denklem), genel yükseklik  $z$  silo duvarında ısrar eden normal yatay basınç  $P_o(Z)$ 'nin üssel formunu verir;

$$P_o(Z) = \frac{\gamma \cdot R}{2\mu_{GW}} \left[ 1 - e^{-2\frac{z\mu_{GW}\lambda}{R}} \right] \quad (4)$$

$\gamma$ , silo içindeki malzemenin özgül ağırlığıdır ve  $R$ , silonun yarıçapıdır. Şekil 7’de, Janssen ve Koenen tarafından önerilen; fiziksel olarak idealize edilmiş modele göre, tahıl ve duvarın statik şartlarda etkili basınç dağılımını göstermektedir. Solda a)’daki düşey kesite göre kuvvetler taneye yönlendirilir. Sağ tarafta, b)’deki yatay kesite göre, soldaki taneye ait kuvvetler, duvarın sağına yönlendirilir.

Jamieson (1903), Amundson (1945), Negi ve diğerleri (1977), Schwab ve diğerleri (1994), Vanel ve diğerleri (2000), Ovarlez ve diğerleri (2003), Tatko ve diğerlerinin yaptığı deneysel kanıtlar gibi (Amundson, 1945; Jamieson, 1903; Ovarlez, Fond, & Clément, 2003; Schwab, Ross, White, & Colliver, 1994; Tatko & Kobielaç, 2008; Vanel ve vd., 2000); Kobielaç (2008) ve Rotter ve vd. (1998), Landry ve vd. (2003) yaptığı sayısal parçacık simülasyon da, böyle bir ifadeyi onaylamaktadır (Landry, Grest, Silbert, & Plimpton, 2003; Rotter, Holst, Ooi, & Sanad, 1998).

Pieraccini, ve diğerlerine göre (2015), Janssen ve Koenen tarafından önerilen modelin uygulanması, sistemin aksel simetrisi artık geçerli olmadığından, dinamik (örneğin hızlandırılmış) şartlarda uygulanamaz (Butenweg ve vd., 2017).



Şekil 7. Statik koşullar için Janssen (1895) ve Koenen (1896) teorisinin fiziksel idealize modeli (Physical idealized model of Janssen (1895) and Koenen (1896) theory for static conditions)

### 3.2. Trahair'nin (1983), Formülsayon Metodu (Formulation method of Trahair (1983))

Trahair ve vd. (1983), tarafından önerilen analitik formülasyon dinamik (acceleration) koşullarda silo çeperi üzerinde etkili olan ek tahıl, basınç dağılımının en eski kapalı form tahminini temsil etmektedir. Bu formülasyon, depolanmış tanenin her yatay katmanının doğrudan duvar çevresine eşit bir şekilde doğrudan bir duvar yükü uyguladığı varsayımına dayanır. Bu yük, bütün depolanan içeriğin katı bir vücut hareketinin sonucudur (Trahair, Abel, Ansourian, Irvine, & Rotter, 1983). Rotter ve Hull'a (1989), göre bu formülasyon, yatay tane-tahıl sürtünme gerilmeleri yoluyla tabana yük transferini dikkate almaz ve dikey tane-duvar sürtünme gerilmelerini görmezden gelir (Rotter & Hull, 1989).

Bu varsayımlar, eylemsizlik kuvvetlerini dengelemek için silo duvarında etkili olan radyal ve çevresel ek basınçların sırasıyla  $\Delta_{PnGW}(\vartheta)$  ve  $\Delta_{P\theta GW}(\vartheta)$  çok basit, koruyucu ifadelerine yol açar:

$$\Delta_{PnGW}(\vartheta) = \frac{\alpha_g \cdot \gamma \cdot R \cdot \cos(\vartheta)}{2} \cdot f \quad (5)$$

$$\Delta_{P\theta GW}(\vartheta) = \frac{\alpha_g \cdot \gamma \cdot R \cdot \sin(\vartheta)}{2} \cdot f \quad (6)$$

Burada  $\alpha_g$  sabit yatay ivmenin yerçekimi ivmesine, yani  $g'$  ye oranıdır,  $\vartheta$ , yatay ivmenin yönüne göre enlemdir ve  $f$ , silonun narinlik oranına bağlıdır: eğer kısa silolar için  $H/R > 1$  olursa tane özelliklerinin silo duvarına etkileyen aşırı basınç dağılımları üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulmaz (birim ağırlık hariç,  $\gamma$ ).

### 3.3. Veletsos ve Younan'ın Dinamik Model Yaklaşımı (1998) (Dynamic Model Approach of Veletsos and Younan (1998))

Veletsos ve Younan (1998) tarafından yapılan analitik çalışma özellikle dinamik koşullarla (acceleration) ilgilidir. Silindirik dikey bir silonun, sismik hareketin uygulandığı sert bir tabana sabitlendiği varsayılmaktadır. Depolanmış malzemenin (malzeme homojen viskoelastik bir bütün olarak modellenmiştir) silo çeperiyle etkileşime giren bir konsol kesme kirişi gibi davrandığı varsayılmaktadır. Tahıl duvarı sürtünmesini modellemek için iki sınır koşulu göz önünde bulundurulur; bunlar pürüzsüz ve pürüzlü arayüzdür. Hem çalkalanma modu hem de kısmi granüler içeriğin dikey yerleşimi, sismik eylemlerin değerlendirilmesinde hesaba katılmaz ve dikey ivmelenme göz önünde bulundurulmaz. Teori hem sağlam hem de esnek duvarı ele alır ve sismik eylemlerin değerlendirilmesindeki ataletlerini açıklar.

Depolanmış ortam için hareket denklemlerinden yola çıkarak, sabit hızlanma, harmonik uyarma ve deprem durumlarında, dinamik duvar basınçlarının (normal ve teğetsel), taban kayma, taban bükülme momentlerinin ve silo temelinde indüklenen yer hareketinin kapalı formda tahmin edilmesi sağlanır. Tüm durumlar için, etkili kütle tanımlanmıştır. En sade durumda, kaba arayüzü olan sert silo duvarlarından biri olarak ortaya çıkıyor. Eurocode 8 tarafından sağlanan mevcut tasarım kuralları bu formülasyona dayanmaktadır.

### 3.4. Eurocode 8 hükümleri (2006) (Eurocode 8 provisions (2006))

Siloların sismik tasarımı için en geçerli Eurocode 8 hükümleri (2006) aşağıdaki araştırmacıların çalışmalarına dayanmaktadır: Younan ve Veletsos (1998) tarafından önerilen ve analitik formülasyon metodu, sadece en güvenli koşulları göz önüne alarak (kaba sert arayüzlü silo duvarı), Rotter ve Hull (1989) tarafından yapılan sayısal

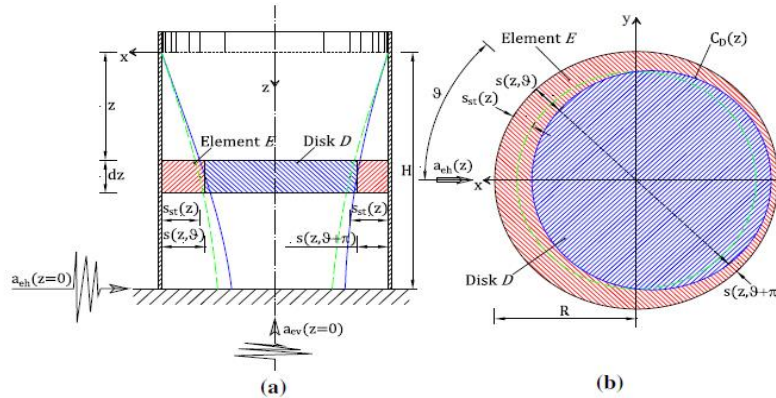
araştırmaya dayanmaktadır. Öte yandan, Veletsos ve Younan (1998) tarafından elde edilen sonuçlar, gerçek duvar esnekliğinin göz önüne alınmasının, özellikle 0.1-0.5 sn arasındaki sürede etkili kütle için önemli ölçüde azalmasına yol açabileceğini göstermektedir (Veletsos & Younan, 1998). Fiili Eurocode 8 hükümlerinde, ek normal basınç dağılımının orijinal formülasyonu, pratik olarak tekdüze boyuna bir profil ( $H/R$ 'nin narinlik oranının fonksiyonu) ve bunun tepkime hızının oranını temsil eden bir büyütme faktörü cinsinden verilmiştir. Duvar ataleti, sismik işlemlerin değerlendirilmesinde (hem çelik hem betonarme silolar için) ihmal edilir. Çeşitli faktörlerin (basınç oranı, tane çeperi ve tane dibi sürtünme katsayıları vb.) yönettiği karmaşık tahıl-silo etkileşimi, sisteme etki eden sismik kuvvetlerin bu değerlendirmesinde hesaba katılmaz.

Etkili kütle için, doğrudan zeminden desteklenmiş silolar ve yüksek silolar için ortak narinlik oranı değerleri için toplam depolanmış ürünün %75 ile %95 aralığında sonuçlandırıldığını göstermektedir. Benzer şekilde, Eurocode 8, ACI 313-97 (1997) tarafından önerilen basitleştirilmiş yöntem, tahıl kütlelerinin asıl hacminin merkezine bağlı olan atalet kuvveti ile depolanmış içeriğin %80'ine (hem desteklenmiş hem de yükseltilmiş silolar için) eşit etkili bir kütle olarak görmektedir.

### 3.5. Silvestri Teorisi (Silvestri Theory)

Hem statik hem de dinamik (acceleration) koşullar altında tahıl benzeri malzeme içeren yerden destekli düztabanlı silolarının duvarındaki basınç dağılımının değerlendirilmesi için analitik bir formülasyon, Silvestri ve vd. (2012) tarafından yakın zamanda önerilmiştir. Silvestri'nin teorisi olarak, Janssen ve Koenen tarafından statik durum için orijinal olarak tanımlanan ve eksenel simetri eksikliğinden kaynaklanan sorunların üstesinden gelmek için Pieraccin ve vd. (2015) tarafından modifiye edilerek yeni bir fiziksel model geliştirilmiştir. Pieraccin ve vd., Silvestri teorisini aşağıdaki gibi özetlemişler.

1. Silo duvarının, Janssen ve Koenen tarafından da varsayıldığı gibi dikey yönde eksenel olarak sonsuz ve sert olduğu varsayılmaktadır.
2. Tahıl-duvar sürtünmesinin, Janssen ve Koenen tarafından da varsayıldığı gibi, tamamen kullanılması gerektiği varsayılmaktadır.
3. Şekil 8 de gösterilen Janssen ve Koenen teorisinin idealize modeli Silvestri tarafından geliştirilerek, her bir tahıl tabakası iki parçaya bölünmüştür: (i) aşağıdaki tabakalara tamamen yaslanmış olan tahıl (orta kısım, disk D) ve (ii) duvar tarafından sürtünme ile tamamen tutulan tahıl (dış simit, eleman E). Bu bölünmüşlük benzetimi Şekil 8. de dikey ve yatay bölümlerde gösterilmektedir.



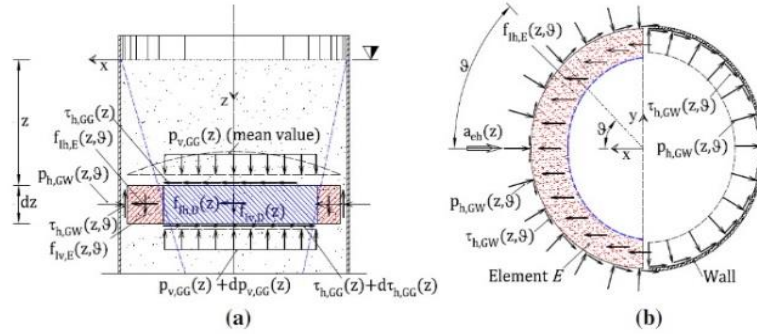
**Şekil 8.** Dış simit (kırmızı tarama) ve tane tabakasının iç diski (mavi tarama). a) dikey kesit, b) düz görünüm (Outer toros (red hatch) and inner disk of the grain layer (blue hatch) a) vertical section, b) flat view)

4. Disk D, Janssen ve Koenen idealize modelinde varsayıldığı gibi  $P_{v, GG}(z)$  'e eşit olarak dağıtılmış dikey basınçlar sunar.
5. Eurocode 8 tarafından öngörülenlerin aksine, yatay tahıl-tahıl sürtünme gerilmelerinin ( $\tau_o, GG$ ) sıfırdan farklı olduğu ve bu nedenle dengede olduğu varsayılmıştır. Bunlar, düşünülen temas yüzeyindeki sürtünme yasasıyla sınırlıdır.
6. Ayrıca  $\tau_v, GW$ ,  $\tau_h, GW$  ve  $\tau_h, GB$  sürtünme gerilmeleri (burada  $v$  = dikey,  $h$  = radyal yatay,  $G$  = tane,  $W$  = duvar ve  $B$  = alt) dengede olacak şekilde göz önünde bulundurulur ve temas yüzeyindeki sürtünme yasasıyla sınırlandırılır.
7. Serbest yüzeyin çok altındaki katmanlarda ve silonun tabanında yatay D disk kayması meydana gelmez.
8. Zaman sabiti dikey ve yatay ivmelenmeler  $a_{ev}(z)$  ve  $a_{eh}(z)$  siloya etki eden deprem yer hareketini simüle etmek için kullanılır.
9. Zaman sabiti dikey ve yatay ivmeler aynı anda uygulanır.

10. Silo duvarının atalet katkıları dinamik koşullarda ihmal edilir. Ayrıca, çalkalama modunun, üst tanecik katmanlarının yatay kaymasının ve tanecik dikey yerleşimlerinin etkileri dikkate alınmamıştır.

11. İki sınır koşulunun dayanım zarfı, ardışık katmanlar arasında E elemanı içindeki farklı dikey normal basınç dağılımları  $P_v$ , GG (z) dikkate alınarak alınır.

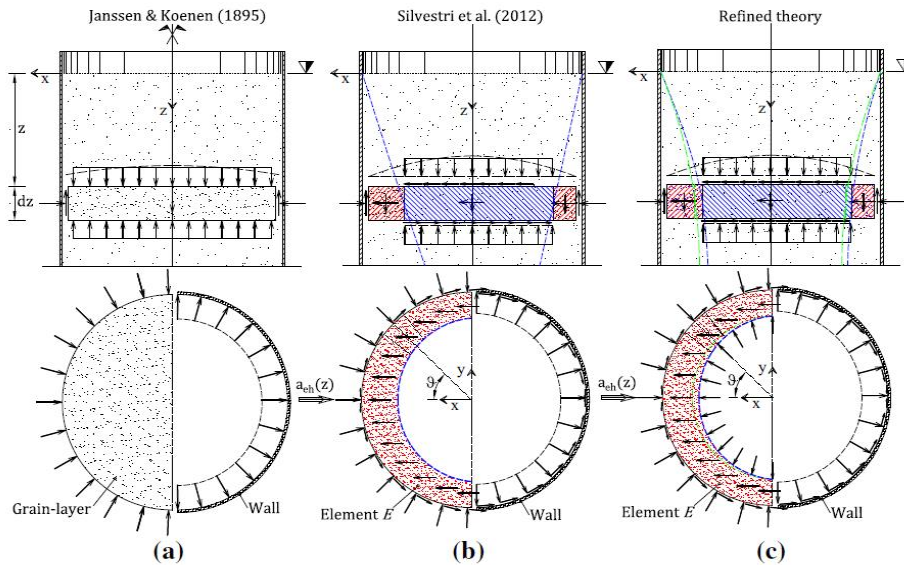
Şekil 9, Silvestri ve vd. (2012), önerdiği fiziki idealize edilmiş modele göre, dinamik (acceleration) koşullarda tahıl ve duvar üzerindeki etki dağılımını göstermektedir. a) Dikey bir enine kesitte gösterildiği gibi kuvvetler taneye yönlendirilir. b) Yatay kesitte görüldüğü gibi, soldaki taneye ait kuvvetler, duvarın sağına yönlendirilir.



**Şekil 9.** Dinamik (Acceleration) koşullar için Silvestri'nin teorisinin (2012) fiziksel idealize modeli (Physical idealized model of Silvestri's theory (2012) for dynamic (Acceleration) conditions)

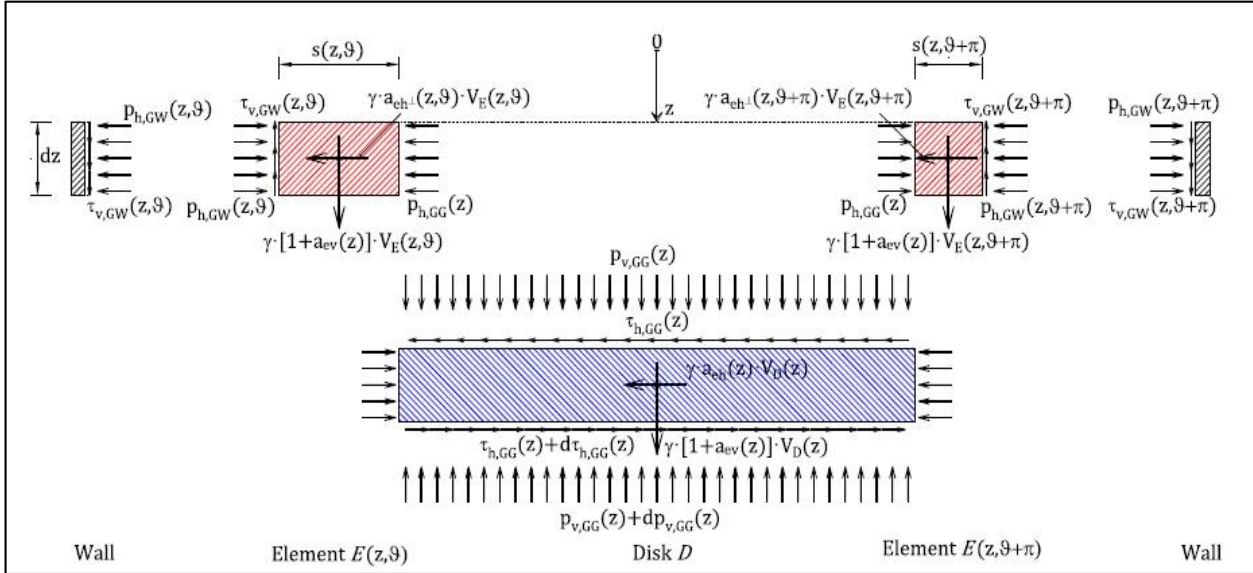
Silvestri'nin, tahıl benzeri malzeme içeren siloların dinamik davranışlarının analitik çalışması, Pieraccini ve vd. tarafından (2015) teorik bir çerçeveye göre geliştirilmiştir (Refined). Orijinal teoride yapıldığı gibi, dinamik (acceleration) şartlardaki denge, sırasıyla yatay ve dikey doğrultular boyunca iki zaman sabiti ivmelenme bileşeni  $a_{eh}(z)$  ve  $a_{ev}(z)$  tarafından oluşturulan ek dinamik etkilerden sorumludur. Daha sonra, basit düz dinamik denge denklemleriyle, silo ve tahıl arasında değiş tokuş edilen basınç dağılımı analitik olarak tanımlanır. En sonunda, türev sonucu olarak, taban duvar kayması ve eğilme momenti, elverişli entegrasyonlarla hesaplanır.

Pieraccini ve vd., Şekil 10'daki fiziksel olarak idealize edilmiş modellerin görsel karşılaştırmasını yapmışlardır. İlk satırda dikey kesit, ikinci satırda yatay kesit görülmektedir. a) Statik koşullar için bir Janssen (1895) ve Koenen (1896) teorisini, b) Silvestri teorisini (2012) ve c) Dinamik (acceleration) koşullar için refine teorisini göstermektedir (2015).



**Şekil 10** Fiziksel idealize edilmiş modellerin görsel karşılaştırması (Visual comparison of physically idealized models)

Şekil 11 ve 12, disk D, eleman E ve silo duvarın dinamik koşullarda değiş tokuş ettiği karşılıklı eylemi göstermektedir. Karşılaştırma amacıyla Silvestri ve vd. (2012) tarafından takip edilen aynı gösterim ve aynı kavramsal yapı, güncellenmiş teorisinin analitik gelişimi içinde benimsenmiştir.



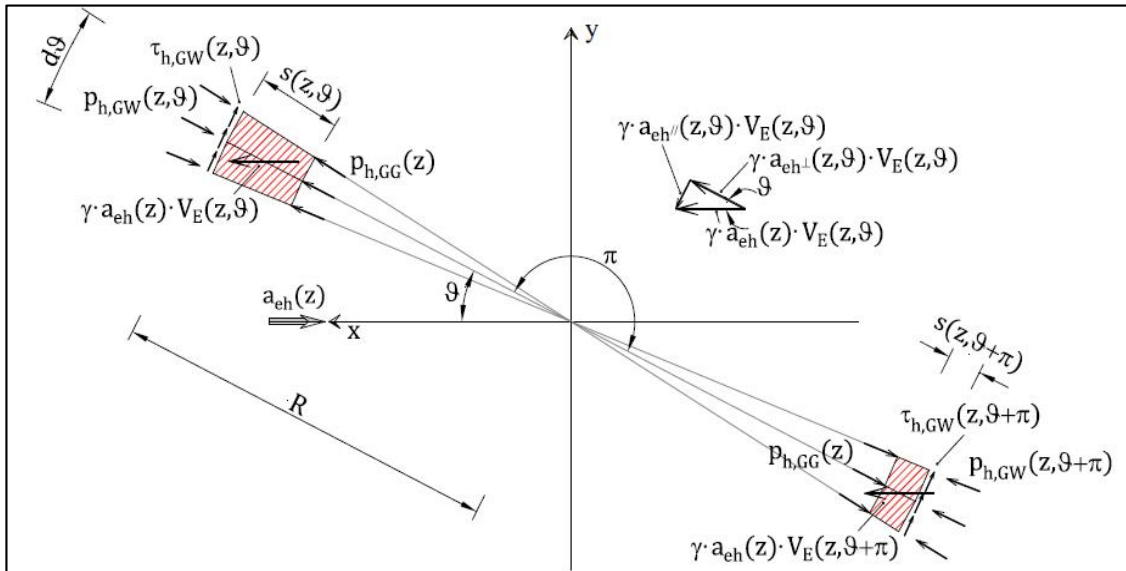
Şekil 11. D ve E elemanlarında dikey ve yatay çalışma hareketleri (Vertical and horizontal movements in D and E elements)

Dinamik koşullarda disk D'nin dikey kuvvet dengesi sağlaması.

$$P_v,GG(Z) \cdot A_D(Z) + f_{1v}, D(Z) - P_v,GG(Z+dz) \cdot A_D(Z) = 0 \quad (7)$$

Burada C1, sınır koşulu uygulayarak elde edilebilecek bir entegrasyon sabitidir (tanenin üst yüzeyinde dikey basınçlar boştur, yani  $p_{v,GG}(z = 0) = 0$ ).

E elementinin temel bir sektöründe faaliyet gösteren yatay hareketler Şekil 12. de gösterilmiştir.



Şekil 12. Yatay kesit: E elementinin temel bir sektöründe faaliyet gösteren yatay hareketler (E) (Horizontal section: Horizontal movements operating in a basic sector of element (E))

#### 4. Pieraccini'nın Uygulama Örnekleri ve Tartışma (Applications of Pieraccini and Discussion)

Bu bölümde Pieraccini'ni ve vd. yaptığı (2015) rafine teorisine göre, Janssen ve Koenen teorisi ile Silvestri'nin teorisi, Trahair formülasyonu ve Eurocode 8 hükümleri arasında kısa bir karşılaştırma uygulamalı örnekler yoluyla sunulmaktadır. Karşılaştırma hem statik hem de hızlandırılmış koşullarda (tane yatay ve dikey ivmeler için sabit bir dikey profil varsayarsak), tane duvarı basınçları, duvar kesme ve eğilme momentleri açısından yapılır.



#### 4.1. Statik Koşullarda Basınç (Pressure in Static Conditions)

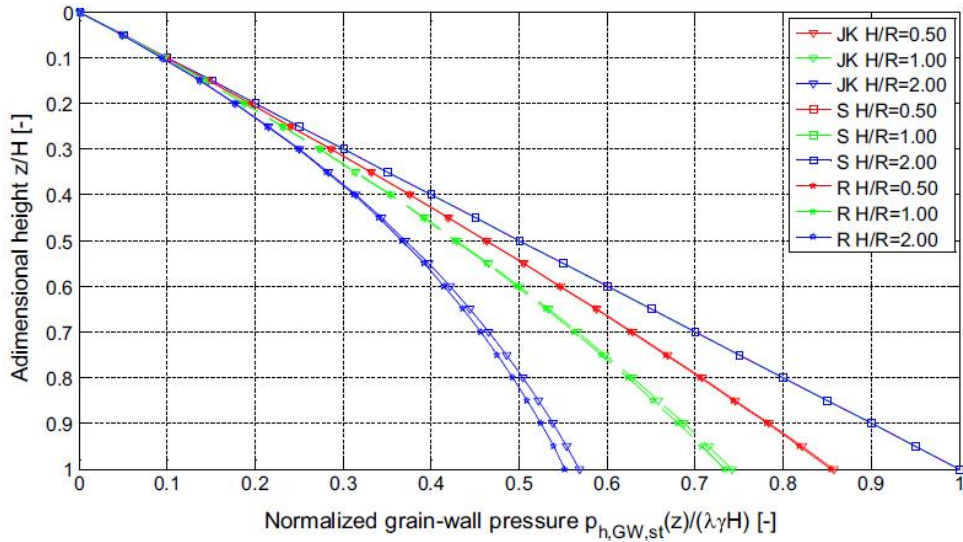
Bu bölümde, Janssen ve Koenen teorisi, Silvestri teorisi ve rafine teorisi tarafından sağlanan tane-duvar basınçlarının boy profilleri sunulmaktadır. Şekil 12, farklı uzunluk oranları (Malhotra 2000'deki düşük, ortalama, yüksek modele göre) ve  $\gamma = 15,000 \text{ N/m}^3$ ,  $\mu_{GW} = 0,45$  ve  $\lambda=0,70$  ile karakterize edilen üç silo için basınç profillerini rapor etmektedir (Malhotra, 2000). Tahıl-duvar basınçları, temel yatay geostatik tanecik-tanecik basıncı, yani  $\lambda$ ,  $\gamma$  ve  $H$ 'a göre normalleştirilmiştir.

Rafine formülasyon, konsolide Janssen ve Koenen formülasyonlarını iyi bir uyum ile eşleştirebilir. Öte yandan, Silvestri'nin teorisinin narinlik oranına bağlı olmayan doğrusal bir dağılım sağladığı gösterilmiştir. Silvestri'nin teorisinin ve rafine teorisinin Janssen ve Koenen formülasyonu ile karşılaştırmalı olarak sunulması, Formül (4) de belirtildiği gibi, tahıl-duvar basınçlarının üssel fonksiyonunun farklı bir yaklaşım seviyesine uzanır. Üstel fonksiyonunu Taylor Serileri vasıtasıyla  $e^{-a} = 1 - a + \frac{a^2}{2} + O(\mathcal{E}^3)$  olarak ifade ederek, burada  $a = \frac{2\omega(z)}{R}$  değerinde, sırasıyla Janssen ve Koenen formülünün birinci ve ikinci mertebeye yaklaşımları ortaya çıkar.

Denklem (10)  $z$  için doğrusaldır. Silvestri'nin teorisinin statik koşullarda boş kalınlıkta  $s_{st}(z)$  sağladığı düşünüldüğünde, tane-duvar basınçları,  $D$  diskinde etki eden yatay tane-tane geostatik basınçlarına eşit olur. Bu eğilim, tahıl içermeyen serbest-yüzeyle karşılık gelen Janssen ve Koenen formülasyonunun eğimiyle eşleşir.

$$P_{h, GW}(z)_{I^0} = \lambda \cdot \gamma \cdot z \quad (10)$$

Janssen (1895) ve Koenen (1896) teorisi, Silvestri teorisi (2012) ve rafine teori statik koşullarda: a)  $H/R = 0,50$  b)  $H/R=1,00$  ve c)  $H/R = 2.00$  karşılaştırmalı olarak, normal basınç dağılımları Şekil 13.'desunulmuştur.



Şekil 13. Normalize edilmiş tahıl duvarında normal basınçlarının boyuna değişimi (Longitudinal changes of normal pressures in normalized grain wall)

Denklem (11)  $z$  cinsinden kareseldir. Silvestri'nin teorisinin aksine, rafine teori statik koşullarda boş olmayan bir kalınlık  $s_{st}(z)$  kabul eder. Farklı fiziksel idealleşmeler, yani Janssen ve Koenen teorisi için benzersiz bir tahıl katmanı sayesinde, rafine teori için iki farklı bölüme ( $D$  ve  $E$ ) karşı, kalınlık  $s_{st}(z)$  ile ilgili olarak göz ardı edilebildiği zaman sonuçlar benzerlik gösterebilir. Sonra yarıçap  $R$ 'ye kadar  $E$  elemanı incelik ve disk  $D$  pratik olarak tüm  $A$  kesiti ile çakışır, iki fiziksel model tam olarak eşleşir. Bununla birlikte, aynı zamanda,  $\mu_{GW}$ ,  $\lambda$  ve  $H/R$  parametrelerinin daha yüksek değerleri için yaklaşık değer ihmal edilebilir görünmektedir.

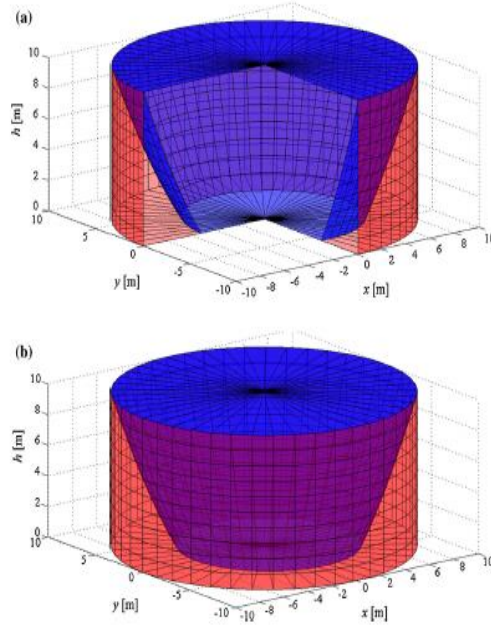
$$P_{h, GW}(z)_{II^0} = \lambda \cdot \gamma \cdot z \cdot \left[ 1 - \frac{\omega(z)}{R} \right] \quad (11)$$

Boş tahıl duvarı sürtünme katsayısı olması durumunda, rafine teori tarafından sağlanan tahıl-duvar basınçlarının büyüklüğü ve yükseklik boyunca profilinin Rankine teorisiyle (1857) eşleştiği belirtilmelidir (Rankine, 1857). Hirshfeld ve Rapaport 2001; Landry ve vd. (2003) göre basınç Janssen analizinde beklendiği gibi,  $\lambda$  oranı Rankine'nin aktif toprak basıncı katsayısı olur (Hirshfeld & Rapaport, 2001; Landry ve vd., 2003).

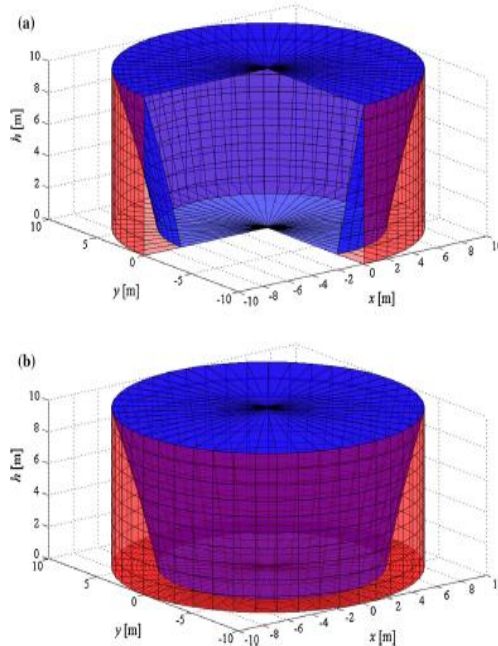
#### 4.2. Dinamik Koşullarda Basınç (Pressure in Dynamic Conditions)

Silvestri'nin teorisi ve rafine teorisi, hem şekil hem de hacim olarak hızlandırılmış koşullarda  $V_{E,dyn}(z)$  ve  $V_{D,dyn}(z)$  hacimlerinin farklı formülasyonlarını sağlar. Bu bölümde  $V_{E,dyn}(z)$  ve  $V_{D,dyn}(z)$  hacimlerinin üç boyutlu grafik gösterimleri orijinal ve rafine edilmiş teorilere göre verilmiştir. Şekil 14 ve 15, üniter narinlik oranı ( $H/R=1,00$ ),  $R=10$  m,  $\gamma=15.000$  N/m<sup>3</sup>,  $\mu_{GW} = 0,45$  ve  $\lambda = 0,70$  ile tanımlanan ve dinamik bir girişe maruz bırakılan bir silo için  $a_{eh0} = 0,30$  ve  $a_{ev0}=0$  iki tane tahıl bölümünü göstermektedir.

$V_{E,dyn}(z)$  hacminin Silvestri'nin teorisi ve rafine teorisi için sırasıyla tahılın üst yüzeyine göre bir dışbükey ve içbükey bir şekil aldığı görülmektedir. Eşit dinamik girdi altında,  $V_{E,dyn}(H)/V$  oranı, yani, etkili kütle tarafından kullanılan hacim ile kısmi tane hacmi arasındaki oran, sırasıyla Silvestri'nin teorisine göre %30 ve rafine teorisine göre %25 civarındadır. Bu tür değerler, sırasıyla basitleştirilmiş ve Eurocode 8 doğru yöntemle sağlanan %80 ve %83 ile karşılaştırıldığında fark edilir bir sonuç verir.



**Şekil 14.** Silvestri teorisi için düz tabanlı silonun D kısmının (mavi renkte) ve E kısmının (kırmızı renkte) üç boyutlu görünümü: a) kısmi görünüm ve b) genel görünüş (Three-dimensional view of part D (in blue) and part E (in red) of the flat bottom silo for Silvestri theory: a) partial view and b) general view)



**Şekil 15.** Rafine teorisi için düz tabanlı silonun D kısmının (mavi renkte) ve E kısmının (kırmızı renkte) üç boyutlu görünümü: a) kısmi görünüm ve b) genel görünüş (Three-dimensional view of part D (in blue) and part E (in red) of the flat bottom silo for refining theory: a) partial view and b) general view)

## 5. Siloda Taban Kesme Kuvveti ve Eğilme Momenti (Base Shear Force and Bending Moment in Silo)

Pieraccini ve vd. (2016), etkili kütle, radyal aşırı basınçların dikey profilinin, duvar tabanında kesme gerilmesi ve silo duvarına etki eden devrilme momenti tahmini için bir dizi kod-benzeri formül setini, tahıl-silolarının sismik tasarımında kullanılması için önerdiler. Deneysel doğrulama, geniş (squat) silolara atıfta bulunsa bile, literatürde diğer yazarlar tarafından önerilen deneysel bulgular ile karşılaştırılması, gelecekteki deneysel çalışmalar için kabul edilme olasılığını öne sürmüşlerdir (Pieraccini, Palermo, Silvestri, Gasparini, & Trombetti, 2016). Bu formüller aşağıdaki gibi sıralanabilir.

### Analitik Çözüm

Parametrik çalışma, siloların sismik tasarımında kullanılan ana miktarların belirlenmesine odaklanır, örneğin: (i) etkili kütle, (ii) maksimum yatay aşırı basınç; (iii) duvarda taban kesme kuvveti ve (iv) Silvestri-Pieraccini formülasyonundan başlayarak duvar tabanı eğilme momenti hesaplanır. Pieraccini dinamik koşullar altında ve Janssen'a göre statik koşullar altında mühendislik açısından bakıldığında, etkili kütle yaklaşık olarak aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Pieraccini, Palermo, Stefano, & Trombetti, 2017; Pieraccini ve vd., 2015);

$$m_{eff} \cong 1 + \frac{1-e^{-\varpi}}{\varpi} \quad (13)$$

Duvar kesme gerilmesi ile ilgili olarak, etkili kütle ile ilişkili yatay ataleti dengeler, sonuç olarak aşağıdaki formül çıkar.

Duvarda kesme gerilmesi

$$T = a_{eh0} \cdot \gamma \cdot (\pi R^2 h_b) \cdot m_{eff} \quad (14)$$

Duvar kaidesinin bükülme momenti  $M=(z=h_b)$  ile ilgili olarak, duvar kaidesinin T çarpmasının bir kolun b ile çarpılması olarak ifade edilebilir:

Eğilme momenti hesabı;

$$M=b.T \quad (15)$$

### Kod-benzeri formülasyon ile taban kesme kuvveti ve eğilme momenti tahmin edici formüller;

Silo duvarına dinamik koşullar altında etkiyen kuvvetler, silo yüksekliği boyunca dikey ivmenin tekdüze bir dikey profili göz önüne alınarak değerlendirilir. Tahıl ve silo duvarı arasında dinamik şartlar altında yapılan karşılıklı eylemler şöyle sonuçlanır:

#### Duvarda kesme gerilmesi T (z) sonuçları:

$$T(z) = \gamma \int_0^z a_{eh}(z) \int_0^{2\pi} \left( R \cdot s(z, \vartheta) - \frac{s(z, \vartheta)^2}{2} \right) d\vartheta dz \quad (16)$$

#### Eğilme momenti M (z) sonuçları:

$$\begin{aligned} M(z) &= M_1(z) + M_2(z) \\ M_1(z) &= \int_0^z T(z) \cdot dz \\ M_2(z) &= \int_0^z \int_0^{2\pi} T_{v,GW}(z, \vartheta) R^2 \cos\vartheta d\vartheta dz \end{aligned} \quad (17)$$

Bir siloyu yapısal olarak tasarlayabilmek için bir mühendis, dökme (bulk) katı tarafından meydana gelen yüklere ek olarak rüzgar ve sismik eylemlerden kaynaklanan etkileri de göz önünde bulundurmalıdır. Bu bölümde, tahıl silolarının sismik tasarımı için EN 1998-4 (2006) tarafından sağlanan etkili kütle, radyal aşırı basınçlar ve duvar tabanı kesme kuvveti ve eğilme momenti açısından formüller sunulacaktır.

### Taban kesme kuvveti ve taban devrilme momenti için EC8 Tasarım formülleri

EC8 yönergelerine (B. Standard, 2006), Rotter ve Hull (1989)'un sayısal çalışmadaki tahıl silolarının sismik tasarımı (Rotter & Hull, 1989) ve Pieraccini ve vd. teorik formasyonuna (B. Standard, 2006) 'e göre, tahılın silo duvarında uyguladığı radyal aşırı basınç;

$$\Delta ph, s(z) = \alpha(z) \gamma \min \left[ \min \left( h_b; \frac{d_c}{2} \right); 3x \right] \quad (18)$$

Tekdüze bir dikey profil göz önüne alındığında, buna karşılık gelen etkin kütle, kesme gerilmesi ve sonuç tarafından verilen eğilme momenti aşağıdaki gibi formülize edilir:

**Etkin kütle hesabı;**

$$m_{eff,EC8} = 1 - \frac{1}{12\Delta} \quad (19)$$

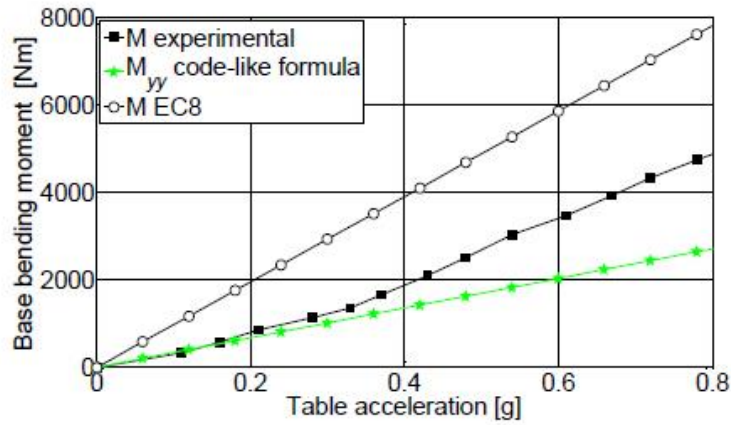
**Taban kesme kuvveti hesabı;**

$$T_{EC8} = \alpha \gamma \cdot m_{eff,EC8} \cdot (\pi R^2 h_b) \quad (20)$$

**Eğilme momenti hesabı;**

$$M_{EC8} = \alpha \gamma \cdot \frac{\pi R^2}{2} \left( h_b^2 - \frac{R^2}{27} \right) \quad (21)$$

Şekil 16, önceki bölümlerde (Denk. 15) ve EC8 yönergesinde (Denk. 21) önerilen kod benzeri formüllerle düşük genlik artışına sahip düşük frekanslı taban girişine tabi tutulan silo numunesi için deneysel duvar tabanı eğilme momentini karşılaştırılmaktadır (Pieraccini ve vd., 2016). Yatay ivmenin kritik değeri ( $a_{crit} \cong 0,3$ ) olana kadar, kod benzeri formülle elde edilen duvar tabanı eğilme momenti, makul bir tahminini sağlarken, deneysel değerlerin %100'lük sonuçlarını artırdığı gözlemleniyor. Harmonik girdi altında, duvar kaidesinin eğilme momentinin değerleri Eurocode 8 hükümlerine göre elde edilen değerlerin yaklaşık 1/2'sidir.



Şekil 16. Eğilme momenti karşılaştırılması (Bending moment comparison)

Pieraccini, ve vd. (2017) mevcut çalışmasında, daha önceki dönemlerde yaptıkları çalışmalarına dayanarak (Silvestri Pieraccini teorisi) tahıl silolarının doğal dönemlerinin değerlendirilmesi için analitik bir formülasyon sunmuşlardır. Yeni formülasyonun öngörülerini deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır. Tahıl silolarının doğal periyotlarının tahmini için analitik bir formülasyon önerilmiştir. Silo, deprem yer hareketi sırasında aktive edilen kısır kütlelerin bir kısmına karşılık gelen kütleye artı kütlelerin kütlelerine eşit olarak uygulanmış bir kütleyle sahip eşdeğer bir kayma-eğilme dirsekli giriş olarak modellenmiştir. Bunu yaparak, tamamen analitik bir formül elde edilmiştir (Pieraccini ve vd., 2017).

## 6. Silo Sismik Tasarımında Yeni Yaklaşımlar (New Approaches in Silo Seismic Design)

Bu çalışma kapsamında, tahıl depolama silolarının sismik analizine katkı sağlamak için, deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar analizinde yeni yaklaşım önerileri yer almaktadır. Bu öneriler doğrultusunda gelecekte gerçekleştirilecek projeler ile tahıl silolarının sismik analizinde önemli mesafeler alınabilir.

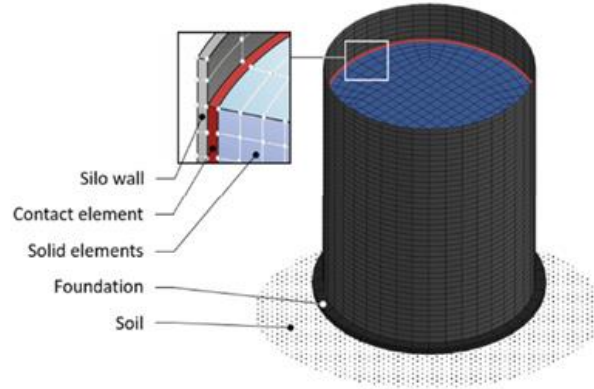
### 6.1. Tasarım Hataları ve Deneysel Çalışmalar için Öneriler (Suggestions for Design Errors and Experimental Studies)

Tahıl silolarının yapısal davranışını anlamak için harcanan önemli araştırmalara rağmen, her yıl, diğer yapılardan çok daha fazla sıklıkta, kötü tasarım ve kötü inşaat nedeniyle çok sayıda silo hala hasar görmektedir. Gerçek şu ki, tasarım prosedürlerinin sınırları olduğunu ve bu nedenle silo yapılarının yapısal davranışı bilgisinde önemli gelişmelerin hala gerekli olduğunu göstermektedir. Tahıl-siloların eşleşmiş (tahıl-silo) davranışını daha iyi anlamak için masa üstü ölçekli modellerle çalkalama testleri de dahil olmak üzere son yıllarda bazı deneysel testler yapılmıştır. Deneysel çalışmaların yanı sıra, sonlu elemanlar metodu ile yapılmış birçok çalışma vardır. Fakat bu çalışmalar, silo tasarımcıları ve üreticileri için anlaşılabilir nitelikte içerik sağlayamamaktadır.

Burada, deneysel modellerin gerçekte kullanılan modelleri tam olarak temsil etmediği ve sonlu elemanlar modelinin tanecikli dökme malzemeyi (bulk material) simule edemedikleri ifade edilebilir. Şekil 17 da Silvestri ve vd. (2016), sarsma tablası testi literatürdeki önemli çalışmalardan biri olmakla birlikte, genelde konik çatı şeklinde imal edilen silo modelini ve davranışlarını yansıtamamaktadır (Silvestri ve vd., 2016). Şekil 18. deki Butenweg ve vd. (2017), yapmış olduğu sonlu elemanlar modelinde tanecik ile silo arasında contact eleman kullanılsa da, dökme malzemenin silindirik bir kütle olarak modellenmesi, gerçek tane-tane ve tane-silo etkileşimini temsil etmemektedir. Benzer şekilde Livaoglu ve Durmuş çalışması (2015) ve Mehrethran ve Maleki (2018) çalışması da benzer şekilde yapıldığından, tahıl depolama silolarının sonlu elemanlar modelinin yeni bir anlayışla ele alınmasında olacağı göstermektedir (Livaoglu & Durmuş, 2016; Mehrethran & Maleki, 2018).



Şekil 17. Silvestri ve vd. Sarsma tablası testi (Silvestri et al. Shaking table test)



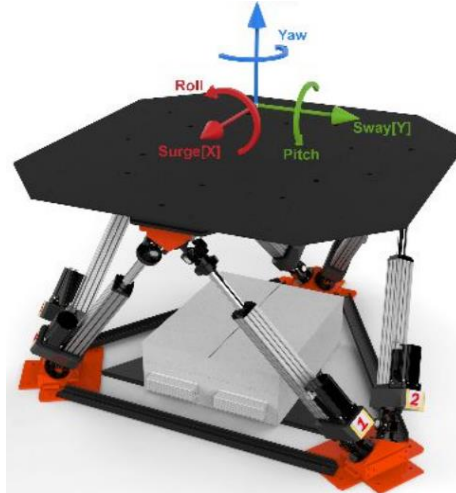
Şekil 18. Butenweg ve vd., sonlu elemanlar modeli (Butenweg ve vd., sonlu elemanlar modeli)

Literatürde daha önce yapılmış deneysel çalışmalarda kullanılan benzer silo modeli üstü açık olarak yapılmıştır, hâlbuki silonun çatı şekli, yatayda ve dikeyde meydana gelebilecek kuvvetlerin dağılımı noktasında önem arz etmekte ve hasar durumlarını büyük oranda değiştirmektedir. Şekil 19'da görüldüğü gibi sismik yükleme altında konik çatı çökmesi meydana gelebilmektedir. Tahıl depolama siloların çatıları genellikle 30 derecelik bir koni şeklinde tasarlanmaktadır, bu model olduğu gibi ölçeklenerek sarsma tablasında kullanılabilir, ayrıca tahılların dinamik hareketlerini gözlemleyebilmek için silo içeresine IP kameralar yerleştirilerek içindeki dökme malzemenin dinamik hareketleri gözlemlenebilir.



Şekil 19. Silo çatısının çökmesi (Collapse roof of silo)

Dinamik sismik analizi gerçekleştirmek için deprem araştırma laboratuvarları kullanılabilir. Şekil 20. de görüntüsü verilen SANLAB SMotion3000 markalı sarsma tablası 2.5x2.5 m boyutlarında, altı serbestlik dereceli ve 2000 kg'lık yük kapasitesine sahiptir. Üretici firma tarafından sağlanan yük kontrol yazılımı vasıtasıyla sarsma tablasında sinüzoidal yük uygulanabileceği gibi El-Centro ve Kocaeli gibi deprem kayıtları da uygulanabilmektedir (Cihaz Kataloğu). Böyle bir sarsma tablası ile üretici firmalar tarafından ölçeklenerek üretilen, tahıl depolama siloları birçok açıdan, farklı parametrelerle, ayrıntılı analizlerinin yapılması mümkündür.



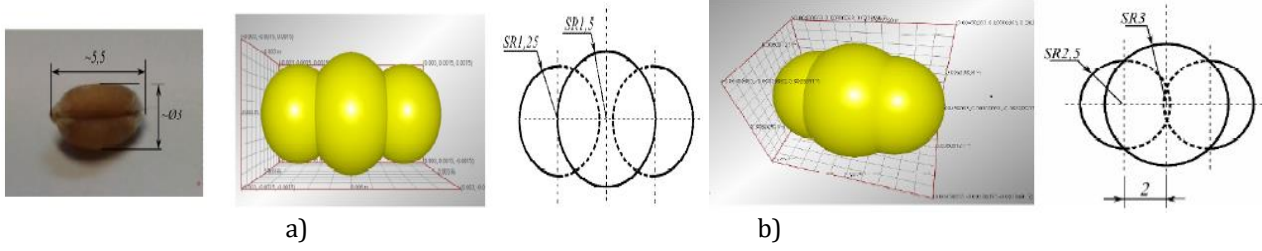
Şekil 20. DOF Sarsma tablası (DOF Shacking table)

## 6.2. Sonlu Elemanlar Metodunda Yeni Yaklaşımlar (New Approaches in Finite Element Method)

Ayrık Eleman Modelleme (DEM-Discrete element method) teknolojisi ile desteklenen EDEM yazılım sayesinde, her türlü tahıl, kömür, mayınlı cevherler, toprak, tablet ve tozlar gibi dökme malzemelerin davranışını hızlı ve doğru bir şekilde simülasyonunu ve analizlerini yapmak mümkündür. EDEM ile yapılan simülasyonlarının temel adımları parçacık üretimi, temas algılama, kuvvet ve momentlerin hesaplanması, hareket denkleminin çözümü, yeni pozisyonların değerlendirilmesi ve yeni etkileşim kuvvetlerinin belirlenmesinde, temas yasalarının kullanılması şeklindedir. Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesini sağlayan her zaman bazı görselleştirme motorları vardır. EDEM simülasyonunun muhtemel hataları, parçacıklar için rijit cisim modelinin kullanılmasından ve parçacıklar arasındaki etkileşimi etkileyen mikromekanik parametrelerin belirlenmesinin zorluklarıdır. Simülasyonlardaki hata olasılıkları nedeniyle, simülasyonlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılabilir (simulation, 2019).

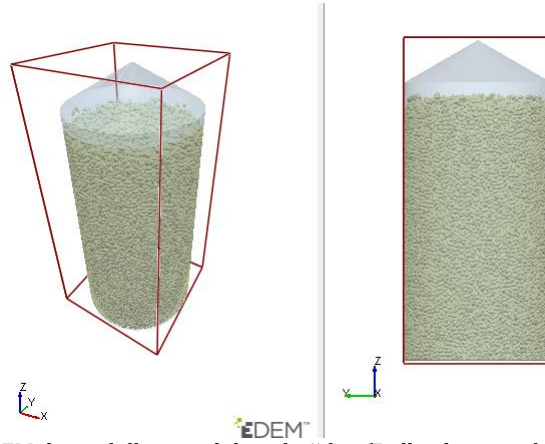
Örnek bir parçacık modeli için buğday tanecikleri, sırasıyla 3 mm veya 2.5 mm yarıçaplarına sahip üç küre oluşturulabilir. Kürelerin merkezlerinin kenarlar arasındaki uzaklığı 2 mm'dir (Şekil 21.). Bir partikülün kütlesi 0.238 gr, atalet momentleri  $1.43 \times 10^{-9} \text{ kgm}^2$  ve  $8.015 \times 10^{-10} \text{ kgm}^2$  dir. Bu çalışma kapsamında bilgisayarda yapılacak analizlerde ilk defa Keppler ve diğerleri(2012) tarafından "Karışık bir akış kurutucuda tane hızı dağılımı" başlıklı

çalışmasında modellenen ve Oldal ve Safranyik,(2015) boyutları yeniden düzenlenen Şekil 10(a) deki tasarım modeli kullanılmıştır (Keppeler, Kocsis, Oldal, Farkas, & Csatar, 2012; Oldal & Safranyik, 2015). Bu örnekte, parçacık modeli, sırasıyla 1.5 mm ve 1.25 mm yarıçaplara sahip üç küre kümesi şeklindedir. Kürelerin kenarlarındaki kenarlar arasındaki mesafe 1,5 mm'dir.



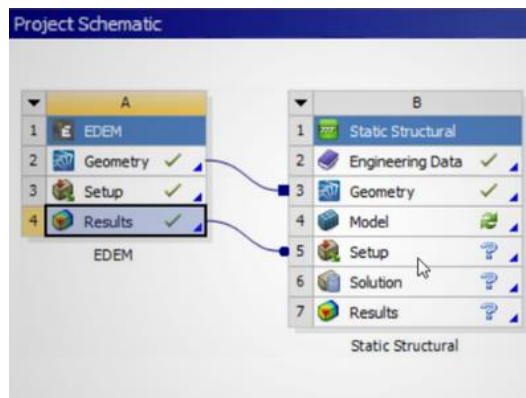
**Şekil 21.** EDEM yazılım ile buğday tanesi ve geometrisi (Oldal ve Safranyik,(2015) (Wheat grain and geometry with EDEM software (Oldal and Safranyik, (2015))

Şekil 22. deki DEM modeli Horabi ve diğerleri, (2016) tarafından bir sığ model silosunun dibindeki dikey basıncın, radyal dağılımına bir doldurma yönteminin, tohum boyutunun ve tohum en boy oranının etkilerini incelemek için yaptıkları çalışmadan esinlenerek modellenmiştir. Buradan devam ederek düztabanlı silonun sismik yer sarsıntısına verdiği tepkiler belirlemek için kullanılabilir (Horabik, Parafiniuk, & Molenda, 2016). Deprem ivme değerleri EDEM yazılım içinde verilerek elde edilen kuvvetlerin etkileri ANSYS içerisinde EDEM for ANSYS tool yardımı ile silo üzerindeki etkileri gözlemlenebilir. Önerilen bu yeni analiz yaklaşımına bir ön çalışma niteliğinde, EDEM yazılım kullanılarak ayırık elemanlar olarak buğday tanecikleri modellenmiş ve siloya doldurulmuş (Şekil 22.).



**Şekil 22.** DEM ile modellenmiş dökme buğday (Bulk wheat modeled with DEM)

ANSYS Sonlu Elemanlar Analizi'nde (Finite Element Analysis- FEA) sıklıkla kullanılan bir yazılımdır, ANSYS için EDEM araç çubuğu sayesinde, kömür gövdeleri, kepçeler, kepçe gövdeleri, kömür, kaya ve benzeri gibi dökme malzemeleri işlemek için tasarlanmıştır. Ağır ekipmanların tasarımında meydana gelen gerilmeler, deformasyonlar ayrıntılı olarak gözlemlenmek mümkündür. Burada yola çıkarak Şekil 22, de gösterildiği gibi tahıllar modellenerek, Şekil 23., deki ANSYS için EDEM tool aracılığı ile import ederek, ANSYS içinde modellenen silo içine doldurarak, her türlü sismik analizi yapmak mümkündür.



**Şekil 23.** ANSYS için EDEM tool (EDEM for ANSYS)

## 7. Sonuç (Conclusion)

Tahıl depolama silolarının sismik tepkisi hala güçlü belirsizlikler ve araştırma ihtiyacı duyan konular içermektedir. Bu çalışmada, tahıl benzeri malzeme içeren siloların statik ve sismik tasarımı için teorik çalışmalar ve kod hükümlerine genel bir bakış sunulmaktadır. Deprem zemin hareketinin düztabanlı tahıl depolama silolarının duvarlarında meydana getirdiği hareketlerle ilgili genel konularda şimdiye kadar yapılmış önemli saha çalışmaları bulunmaktadır. Mevcut tasarım hükümleri de bu çalışmalar ışığında geliştirilmiştir. Dolayısıyla tahıl silolarının tasarım hükümleri de yapısal sismik tasarım ile ilgili konularda eksiklikler içermektedir. Bu konu, ciddi deneysel çalışmalara ve daha gerçekçi sonlu elemanlar analizine ihtiyaç duymaktadır. Bu eksikliklerin giderilebilmesi için, üretici firmaların çalışmaları da dikkate alınarak, deneysel çalışmanın konik silo modeli ile en çok depolanan buğday malzemesi ile gerçekleştirilmesi için altı eksenli sarsma tablası testi tavsiye edilmektedir. Ayrıca sismik analizin çok daha fazla parametre ile sürdürülmesi için sonlu elemanlar metodu ile birlikte ayrıık elemanlar metodunun kullanılması bir öneri olarak sunulmuştur. Bu öneriye göre, DEM (discrete element method) yani ayrıık elemanlar metodu kullanarak dökme malzeme olarak modellenen, tahıl malzemesinin, ANSYS için EDEM tool aracılığı ile sonlu elemanlar analizine entegre edilerek, daha gerçekçi bir simülasyon ile tanecikler arası boşlukların doğru belirlenmesi ve tane-tane, tane-silo etkileşimini dinamik şartlar altında doğru modellemesi mümkün olacaktır.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Amundson, L. (1945). Determination of band stresses and lateral wheat pressures for a cylindrical grain bin. *Agricultural Engineering*, 26, 321-345.
- ANSI/ASAE EP433 DEC (R2011) Loads Exerted by Free-Flowing Grain on Bins, USA, EP433 Stat. ( ).
- Braun, A., & Eibl, J. (2009). Pressures under earthquake loading. *Silos: fundamental of theory, behavior and design*. Taylor & Francis, London, 518-527.
- Butenweg, C., Rosin, J., & Holler, S. (2017). Analysis of cylindrical granular material silos under seismic excitation. *Buildings*, 7(3), 61.
- Carson, J., & Craig, D. (2015). Silo design codes: Their limits and inconsistencies. *Procedia engineering*, 102, 647-656.
- Çelik, A. İ., Köse, M. M., Akgül, T., & Apay, A. C. (2019). Effects of The Shell Thickness On The Directional Deformation And Buckling On The Cylindrical Steel Water Tanks Under The Kobe Earthquake Loading. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(2), 269-281.
- Demir, F., & Saltan, M. (2017). Deprem Etkisi Altında Demiryolu Üstyapısı Davranışının İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5, 615-620 doi:10.21923/jesd.283161
- Dogangun, A., Karaca, Z., Durmuş, A., & Sezen, H. (2009). Cause of damage and failures in silo structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23(2), 65-71.
- Hirshfeld, D., & Rapaport, D. (2001). Granular flow from a silo: discrete-particle simulations in three dimensions. *The European Physical Journal E*, 4(2), 193-199.
- Horabik, J., Parafiniuk, P., & Molenda, M. (2016). Experiments and discrete element method simulations of distribution of static load of grain bedding at bottom of shallow model silo. *Biosystems Engineering*, 149, 60-71.
- Jamieson, J. A. (1903). Grain pressures in deep bins. *CSCE Trans. CSCE Trans*, 17:554-607(607), 554-607
- Janssen, H. (1895). *Versuche Über Getreidedruck in Silozellen Vol. 39. Zeitschrift. Verein Deutcher Ingenieure*, Dusseldorf. Germany.
- Kanyılmaz, A., & Castiglioni, C. A. (2017). Reducing the seismic vulnerability of existing elevated silos by means of base isolation devices. *Engineering Structures*, 143, 477-497.
- Keppler, I., Kocsis, L., Oldal, I., Farkas, I., & Csatar, A. (2012). Grain velocity distribution in a mixed flow dryer. *Advanced Powder Technology*, 23(6), 824-832.
- Koenen, M. (1896). Berechnung des Seiten und Bodendrucks in Silozellen. *Centralblatt der Bauverwaltung*, 16, 446-449.
- Landry, J. W., Grest, G. S., Silbert, L. E., & Plimpton, S. J. (2003). Confined granular packings: structure, stress, and forces. *Physical Review E*, 67(4), 041303.
- Li, H. (1994). Analysis of steel silo structures on discrete supports.
- Livaoglu, R., & Durmuş, A. (2016). A simplified approximation for seismic analysis of silo-bulk material system. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(3), 863-887.
- Malhotra, P. (2000). Practical nonlinear seismic analysis of tanks. *Earthquake Spectra*, 16(2), 473-492.
- Mehrehtehran, A. M., & Maleki, S. (2018). 3D buckling assessment of cylindrical steel silos of uniform thickness under seismic action. *Thin-Walled Structures*, 131, 654-667.
- Oldal, I., & Safranyik, F. (2015). Extension of silo discharge model based on discrete element method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(9), 3789-3796.
- Ovarlez, G., Fond, C., & Clément, E. (2003). Overshoot effect in the Janssen granular column: a crucial test for granular mechanics. *Physical Review E*, 67(6), 060302.



- Pieraccini, L., Palermo, M., Silvestri, S., Gasparini, G., & Trombetti, T. (2016). Seismic horizontal forces exerted by granular material on flat bottom silos: experimental and analytical results.
- Pieraccini, L., Palermo, M., Stefano, S., & Trombetti, T. (2017). On the Fundamental Periods of Vibration of Flat-Bottom Ground-Supported Circular Silos containing Gran-like Material. *Procedia engineering*, 199, 248-253.
- Pieraccini, L., Silvestri, S., & Trombetti, T. (2015). Refinements to the Silvestri's theory for the evaluation of the seismic actions in flat-bottom silos containing grain-like material. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(11), 3493-3525.
- Pozzati, P., & Ceccoli, C. (1972). *Teoria e tecnica delle strutture* (Vol. 2): Utet.
- Rankine, W. M. (1857). On the stability of loose earth. *Philos Trans R Soc Lond* 147,9–27.(147).
- Rotter, J. (2001). Guide for the economic design of circular metal silos. Spon. Press. In: Taylor & Francis Group, London, New York.
- Rotter, J., Holst, J., Ooi, J., & Sanad, A. (1998). Silo pressure predictions using discrete–element and finite–element analyses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 356(1747), 2685-2712.
- Rotter, J., & Hull, T. (1989). Wall loads in squat steel silos during earthquakes. *Engineering Structures*, 11(3), 139-147.
- Schwab, C. V., Ross, I. J., White, G. M., & Colliver, D. G. (1994). Wheat loads and vertical pressure distribution in a full-scale bin part I—filling. *Transactions of the ASAE*, 37(5), 1613-1619.
- Silvestri, S., Gasparini, G., Trombetti, T., & Foti, D. (2012). On the evaluation of the horizontal forces produced by grain-like material inside silos during earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(5), 1535-1560.
- Silvestri, S., Ivorra, S., Chiacchio, L. D., Trombetti, T., Foti, D., Gasparini, G., . . . Taylor, C. (2016). Shaking-table tests of flat-bottom circular silos containing grain-like material. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(1), 69-89.
- Simulation, E. (2019). EDEM simulation. Retrieved from <https://www.edemsimulation.com/software/>
- Standard, A. (1996). *Loads on Bulk Solids Containers*, 1996. Standards Association of Australia, 23.
- Standard, B. (2006). *Eurocode 1: Actions on structures*.
- Tatko, R., & Kobiela, S. (2008). Horizontal bulk material pressure in silo subjected to impulsive load. *Shock and Vibration*, 15(5), 543-550.
- Trahair, N., Abel, A., Ansoorian, P., Irvine, H., & Rotter, J. (1983). *Structural design of steel bins for bulk solids*. Australian Institute of Steel Construction, Sydney, Australia, 30.
- Vanel, L., Claudin, P., Bouchaud, J.-P., Cates, M., Clément, E., & Wittmer, J. (2000). Stresses in silos: comparison between theoretical models and new experiments. *Physical review letters*, 84(7), 1439.
- Veletsos, A. S., & Younan, A. H. (1998). Dynamics of solid-containing tanks. II: Flexible tanks. *Journal of Structural Engineering*, 124(1), 62-70.
- Yaylacı, M., & Terzi, C. (2018). Temas Problemlerinde Sonlu Elemanlar Yönteminin Doğruluğunun İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6 (3), 511-519 . doi:0.21923/jesd.407121



## VAN GÖLÜ KAPALI HAVZASINDA YAĞIŞLARIN TREND ANALİZİ

Sevda COŞKUN\*

Karabük Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Karabük, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Trend Analizi,  
Mann-Kendall,  
Yağış,  
İklim,  
Van Gölü.*

### Öz

Çalışmanın alan kapsamını Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde Van Gölü kapalı havzası oluşturmaktadır. Van Gölü Kapalı havzası, Türkiye'nin en büyük ikinci kapalı havzasını meydana getirmektedir. Çalışmanın konu kapsamı; havza içerisinde 30 yıldan fazla rasata sahip 7 istasyonun (Van-Bölge, Muradiye, Erçiş, Gevaş, Özalp, Tatvan ve Ahlat) ortalama yağış verilerinin trend analizidir. Havza genelinde uzun yıllar boyunca ölçüm yapan Van-Bölge, Muradiye, Erçiş, Gevaş, Özalp, Tatvan ve Ahlat istasyonlarının aylık ölçülmüş ortalama yağış verileri ele alınarak yıllık ve mevsimlik eğilimlerini analiz etmek araştırmanın amacını oluşturmaktadır. Kapalı havzalarda iklim değişikliğinin etkilerinin daha kolay fark edileceği düşüncesiyle Van Gölü Kapalı havzası alan olarak seçilmiştir. Ayrıca ulusal ve uluslararası literatüre iklim değişikliği ile ilgili bir Türkiye örneğinin daha kazandırılması istenmiştir. Araştırmada yöntem olarak Mann-Kendall Testi, Spearman'ın Rho ve Şen Testi temel alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Gevaş ve Ahlat istasyonlarında yıllık yağışlarda azalma meydana gelirken, Van-Bölge istasyonunda anlamlı olmayan bir artış görülmüştür. Mevsimlik olarak ise Erçiş ve Ahlat istasyonlarında anlamlı bir azalış tespit edilirken Van-Bölge de ise anlamlı olmayan bir artış gözlenmiştir. Muradiye (kış mevsimi hariç) ve Tatvan istasyonlarında ise genel olarak yağışlarda bir eğilime saptanamamıştır. Havza genelinde hem yıllık hem de mevsimlik yağışlarda azalma eğilimi dikkat çekerken Van Bölge istasyonunda ise anlamlı olmayan artış eğilimi görülmektedir.

## TREND ANALYSIS OF PRECIPITATION IN VAN LAKE CLOSED BASIN

### Keywords

*Trend Analysis,  
Mann-Kendall,  
Precipitation,  
Climate,  
Van Lake.*

### Abstract

The study area comprises of the endorheic basin of Van lake located in the Eastern Anatolia region of Turkey. The Van lake basin formulates Turkey's second-largest closed basin. The subject matter of present study includes trend analysis of average precipitation statistics collected from 7 stations of Van-Region, Muradiye, Erçiş, Gevaş, Özalp, Tatvan and Ahlat with more than 30 years of observation in the basin. The research aims to analyze the annual and seasonal trends of rainfall by collecting monthly measured average precipitation data from Van-Region, Muradiye, Erçiş, Gevaş, Özalp, Tatvan and Ahlat stations that have been measuring the amounts throughout the basin for many years. Mann-Kendall Test, Spearman's Rho and Şen Test were selected as research methods for analysis. According to the results obtained, there was a decrease in annual precipitation in Gevaş and Ahlat stations while an insignificant increase was observed in Van-Region. Seasonally, a significant decrease was detected in Erçiş and Ahlat stations, while a insignificant increase was observed in Van-Region. However, the downward trend in both annual and seasonal precipitation is noteworthy across the basin, while a insignificant increase is observed in Van Region station.

### Alıntı / Cite

Coşkun, S. (2020). Van Gölü Kapalı Havzasında Yağışların Trend Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 521-532.

\* İlgili yazar / Corresponding author: sevdacoskun@karabuk.edu.tr, (0370)-418-6457

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
S. Coşkun, 0000-0002-4702-4670	Başvuru Tarihi / Submission Date	06.02.2020
	Revizyon Tarihi / Revision Date	30.04.2020
	Kabul Tarihi / Accepted Date	06.05.2020
	Yayın Tarihi / Published Date	25.06.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Yağış ve sıcaklık klimatoloji alanında üzerinde en çok araştırma yapılan iki parametre olarak ön plana çıkmaktadır. Bu iki değişkende meydana gelen eğilimler iklim bileşenleri olan litosfer, hidrosfer, kryosfer, atmosfer ve biyosferi son derece etkilemektedir. Küresel ölçekte yapılan araştırmalar sonucunda sıcaklıklarda 0,3 °C ile 0,6 °C bir artışın olduğu ileri sürülmektedir. Küresel sıcaklığın artmasının ve yağış deseninin değişmesinin küresel iklim değişikliğine neden olduğu düşüncesi artık yaygın olarak kabul görmektedir.

Sıcaklıklarda meydana gelen artışın temel nedeni, atmosfer bileşiminde bulunan gazların yoğunluğundaki değişimlere bağlanmaktadır. Şehirleşmeye bağlı olarak son yıllarda nüfusun arttığı alanlarda önemli sera gazlarından olan CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O gibi gazların artışıyla şehirlerde, sıcaklık artmakta ve bu alanlarda mikro klima şartları ön plana çıkmaktadır.

Türkiye'deki ortalama sıcaklıklarının uzun dönemli (1930-1993) trend analizleri dikkate alındığında özellikle Doğu Anadolu bölgesinde pozitif yönlü artışlar görülürken, kıyı kesimlerde ise genel olarak bir soğumanın meydana geldiği sonucuna varılmıştır (Türkeş vd., 1995). Sıcaklıklarda meydana gelen eğilimlere bağlı olarak, yağış rejimlerinde de değişimler meydana getirmektedir. Türkiye'de batıdan doğuya doğru gidildikçe yağışlarda artışların olduğu gözlemlenmiştir (Kadıoğlu vd., 1999). Yağışların alansal ve zamansal özelliklerinin incelenmesi sonucunda istatistiki olarak anlamlı eğilimlerin olduğu görülürken yıllık yağışlarda genel olarak bir azalmanın meydana geldiği belirlenmiştir (Türkeş, 1996). Yağış miktarının azalma gösterdiği bölgeler Akdeniz Bölgesi ve Akdeniz geçiş iklimin yaşandığı alanlarda meydana gelmektedir. Bu durumun; Kuzey ve Kuzey Anadolu görülen orta enlem siklonlarıyla Doğu Avrupa ve Sibiryaya kaynaklı yüksek basınç alanları ile bağlantılı olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, özellikle kış aylarında yağışlarda negatif eğilimlerin meydana gelmesinin temel nedeni belirtilen durum olarak görülmektedir (Türkeş vd., 2009).

Çalışma kapsamında, Türkiye'nin Doğu Anadolu bölgesinde bulunan Van Gölü Kapalı Havzası ele alınmıştır. Yıllık ortalama yağış değerlerinin 1964-2017 yılları arasındaki eğilimlerinin hangi yönde ve boyutta olduğunu tespit etmek araştırmanın amacını oluşturmaktadır.

Sıcaklık ve yağış parametrelerinde meydana gelen salınımlar, iklimin genel yapısının anlaşılması için önemli ipuçları vermektedir. Bu nedenle iklim değişikliği ile ilgili çalışmalar bu iki parametrenin trend analizlerine odaklanmıştır. Alan yazında konuyla ilgili çalışmalara; (Türkeş vd. 1995; Türkeş, 1996; Tayanç vd., 1997; Kadıoğlu, 1997; Kadıoğlu vd. 1999; Lazaro vd., 2001; Türkeş vd., 2002; Tosic ve Ukasevic, 2005; Karabulut ve Cosun, 2009; Türkeş vd. 2009; Aksoy ve Coşkun, 2010; Coşkun, 2011; Türkeş, 2012b; Erlat, 2013; Yenigün, vd., 2013; Emek, 2014; Addisu, vd. 2015; Ackerman ve Knox, 2015; Soydan, vd., 2016; Sönmez, vd. 2016; Coşkun ve Akbaş, 2017; Asfaw vd., 2017; Rahman, vd., 2017; Polat ve Sunkar, 2017; Nourani, vd., 2018; Su, vd. 2018; Karaosmanoğlu ve Günek, 2018; Aktaş, vd., 2018; Avsaroğlu, 2019; Coşkun, 2019; Şenocak ve Emek, 2019; Şener vd., 2019; Coşkun, 2020a, 2020b) örnek verilebilir.

Çalışmada giriş bölümünden sonra alan yazın tarama örnekleri verilecek, materyal ve yöntem açık olarak anlatıldıktan sonra araştırma bulgularına geçilecektir. En son olarak sonuç ve tartışma kısmı ile çalışma tamamlanacaktır.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması (Literature Survey)

Toros (1993), "Klimatolojik serilerden Türkiye İkliminde Trend analizi"; adlı çalışmada, iklimde bir değişim olup olmadığını tespit etmek için Türkiye genelini temsilen 18 meteoroloji istasyonuna ait yağış ve sıcaklık verilerini almıştır. İncelenen iklim parametrelerine homojenlik testleri uygulanmıştır. Verilerin normal dağılım sergilediği belirlenmiştir. Çalışmada Sperman Rho ve Men-Kendall mertebeye korelasyonu istatistik yöntem olarak uygulanmıştır. Trend analizlerinin sonuçlarına göre Türkiye genelinde incelenen istasyonlarda yüksek sıcaklık ve yağışta genelde belirgin bir eğilime rastlanmamıştır. Ancak ilkbahar mevsiminin düşük sıcaklıklarında 1950'li yıllarda başlayan ve zamanla artan bir trend gözlenmiştir.

Şen (2013), "Isparta ilinde sıcaklık ve yağış verilerinin eğilim analizi" adlı çalışmada iklim elemanlarından olan sıcaklık ve yağış parametreleri üzerine analizler yapılmıştır. Isparta ilindeki merkez ilçe dâhil 5 istasyonun sıcaklık

ve yağış verilerine öncelikle non-parametrik analiz yöntemleri olan MannKendall ve Spearman'ın Rho testleri ile analizi gerçekleştirilmiştir. Mann-Kendall ve Spearman analiz sonuçlarına göre yıllık ortalama sıcaklıklarda; Isparta istasyonunda istatistiki açıdan anlamlı artış eğilimleri gözlenirken, yaz mevsiminde tüm istasyonlarda kuvvetli ısınma trendi tespit edilmiştir. Yıllık ortalama maksimum sıcaklıklarda; tüm istasyonlarda anlamlı artış tespit edilmiştir. Kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsiminde bütün istasyonlarda ortalama maksimum sıcaklıklarında ısınma eğilimi hâkimdir. Kış yağışlarındaki azalmanın bütün istasyonlarda görülmesi önceki çalışmalarla uyumluluk göstermiştir.

Emek (2014), “Doğu Anadolu bölgesi yıllık ve aylık toplam yağışların trend analizi” adlı çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır; Doğu Anadolu Bölgesi'ndeki Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 46 adet yağış gözlem istasyonundan alınan, 1960 ile 2013 yılları arasında değişen, verilere Run testi ile Pettitt testi uygulanarak homojenlik analizi gerçekleştirilmiştir. Homojen olduğu belirlenen istasyonlara Mann – Kendall testi ve Spearman'ın Rho testi uygulanarak trend analizi yapılmıştır. Trend analizi sonuçlarına göre; yıllık toplam yağışların % 95 güven aralığında Baskil, Doğanşehir, Erciş ve Sivrice yağış gözlem istasyonları olmak üzere 4 adet yağış gözlem istasyonunda, % 90 güven aralığında ise bunlara ilaveten Ağın ve Elazığ yağış gözlem istasyonları olmak üzere 6 adet yağış gözlem istasyonunda azalan yönde anlamlı trendin varlığı gözlenmiştir. Sen'in eğilim metoduna göre ise 28 adet yağış gözlem istasyonunda azalan yönde bir eğilim, 10 adet yağış gözlem istasyonunda da artan yönde anlamlı olmayan bir eğilim gözlenmiştir. Doğu Anadolu Bölgesi'nin kuzey kesimlerinde genellikle artan yönde trend görülürken, güney ve batı kesimlerinde azalan yönde trend tespit edilmiştir. Aylık toplam yağışların trend analizi değerlendirildiğinde ise yaz aylarında genellikle yağışların artan yönde eğilimde olduğu, kış aylarında ise azalan yönde eğilimde olduğu belirtilmiştir. Yazın haziran ayında bölgede azalan yönde bir eğilim saptanmışken, temmuz ayında yerini artan yönde bir eğilime bırakmıştır. Kasım ayı olduğunda ise bölgeye düşen aylık toplam yağışlarda tekrardan azalan yönde eğilim belirlenmiştir.

Kızılelma (2015), “ İç Anadolu Bölgesinde Sıcaklık ve Yağışların Trend Analizi ” adlı çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır. Mann-Kendall ve Sen'in Eğilim Testleri ile Lineer Regresyon Analizi yöntemleri uygulanmıştır. İç Anadolu Bölgesinde bulunan istasyonların sıcaklık ve yağış parametreleri araştırılmıştır. Parametrik olmayan testler kullanılarak sıcaklıklardaki eğilim analiz edilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde ortalama, maksimum ve minimum sıcaklıklara anlamlı artışların olduğu tespit edilmiştir.

Kamruzzamana vd. (2016), Estimation of trends in rainfall extremes with mixed effects models” adlı çalışmada; Avustralya'nın güney kesiminde şiddetli yağışların gözlemlenme değişkenliğini şehir planlaması açısından 6 dakikalık şiddetli yağış sürelerinin bilinmesine göre düzenlemiştir. Bu sürelerin bilinmesinin çok önemli olduğunu, yağışların gözlemlenme değişkenliğinin arttığını fakat yıllık yağış miktarında bir değişkenliğin olmadığını belirtmişlerdir.

Şapolya, (2017) “ Ege bölgesi aylık sıcaklık verilerinin bölgesel ortalama Mann-Kendall testi ile trend analizi”; adlı çalışmada, Türkiye'de olası iklim değişikliğinden önemli bir şekilde etkileneceği öngörülen bölgelerden biri olan Ege Bölgesi araştırılmıştır. Bölgedeki 13 istasyonun aylık ortalama sıcaklık (1965-2015) parametrik olmayan Mann-Kendall Sıra Korelasyon Testi ve Bölgesel Ortalama MannKendall Sıra Korelasyon Testi kullanılmıştır. Mann-Kendall testi sonuçlarına göre, nisan-ekim ayları arasında sıcaklıklarda istatistiksel açıdan önemli (%5 ve %1 önem seviyesinde) artışların olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Mevsimlik olarak, artma eğilimi 4 mevsimde de söz konusu iken yaz mevsiminde tüm istasyonlarda önemli bir artma eğilimi gözlenmiştir. Bölgesel olarak incelediğinde sıcaklık değerlerinde önemli artışların Mayıs-Eylül ayları arasında olduğu, mevsimlik sıcaklık eğilimlerinde ise 4 mevsim için de artma eğilimi olduğu ve bu eğilimlerin kış mevsimi hariç bütün mevsimlerde önemli olduğu belirlenmiştir.

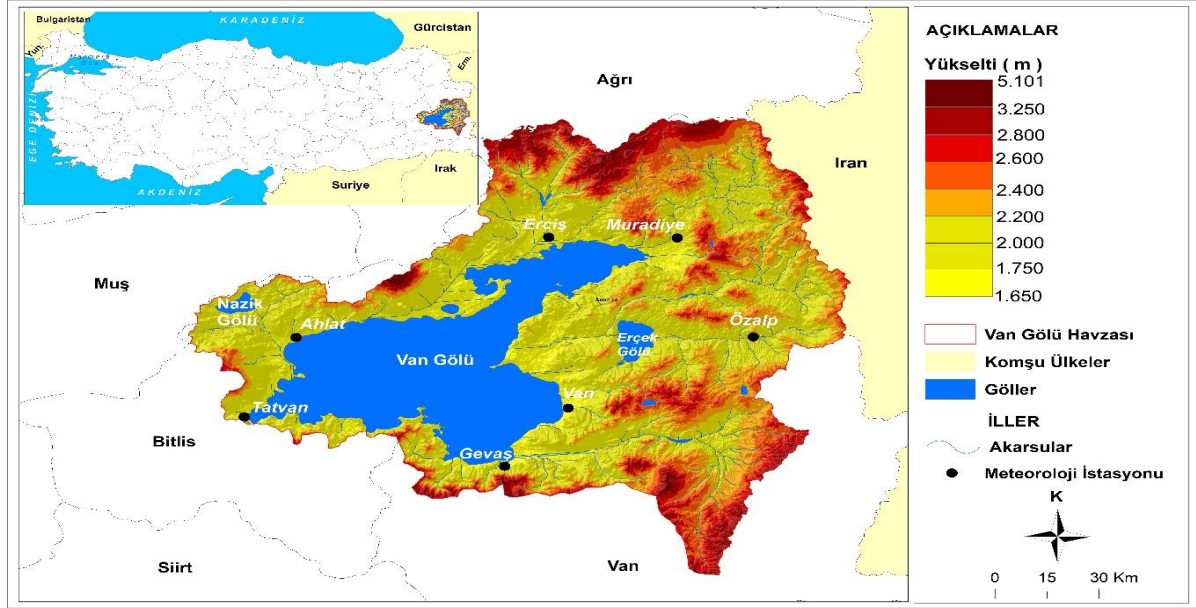
Araştırmaya bir kapalı havzanın konu edilmesi iklim değişikliğinde sıcaklık ve yağış desenlerindeki değişimin daha kolay fark edilir olmasından kaynaklanmaktadır. Araştırma konusunun seçilmesinde daha önce çalışılmamış olması ve literatüre subtropikal iklim kuşağından bir Türkiye örneğinin daha kazandırılması düşünülmüştür.

### 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

#### 3.1. Çalışma Alanı (Study Area)

Van Gölü kapalı havzası, ortalama yükseltinin en fazla olduğu Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer almaktadır. Oluşum olarak yaklaşık 13 milyon yıl önce Avrasya ve Arap plakalarının çarpışması sonucu sıkışmaya bağlı olarak meydana gelmiştir (Şaroğlu ve Yılmaz, 1986). Türkiye'nin en büyük gölü olan Van Gölü 3602 km<sup>2</sup>lik yüzey alanına ve maksimum 451 metre derinliğe sahiptir. ‰ 21,7 oranında tuzluluk, 614 km<sup>3</sup>lük su hacmi ve 9,7 pH değeri ile sodalı göl olarak dünyanın en büyük gölüdür. Ayrıca havza adını bu gölden almıştır. Geç Pliyosen'de oluşmuş ve Kuvaterner'de etkili olan volkanik olaylar sonucunda bugün ki son şeklini kazanmıştır (Blumenthal vd., 1964; Wong ve Finckh, 1978; Kempe vd., 1978; Degens vd., 1984). Deniz seviyesinden yüksekliği 1648 metre ve su

toplama havzası, Ercek kapalı havzası da dahil edildiğinde 17.902 km<sup>2</sup> alana sahiptir (Altan Aydın, 2017). Van Gölü kapalı havzasının şekillenmesinde tektonik olayların etkisi büyüktür. Havza içerisinde batıya doğru akarsu boyları kısaltmakta ve araziye yüksek morfolojik üniteler kuşatmaktadır. Akköprü (2019), Van Gölü'nün güneybatısındaki akarsular kaynaklarını aldıktan çok kısa bir mesafe sonra göle dökülmektedir. Dicle Nehri su toplama havzası ile Van Gölü su toplama havzası bu alanda birbirlerine çok yaklaşmakta olduğunu belirtmiştir. Havza içerisinde doğudan gelen akarsuların boyu daha uzun ve gölü daha çok bu kesimdeki akarsular beslemektedir (Şekil.1).



Şekil 1. Araştırma Alanının Lokasyon Haritası (Location Map of the Research Area)

### 3.2. Metodolojik Yaklaşım (Methodological Approach)

Van Gölü kapalı havzasının 1964-2017 yıllarını kapsayan, Van-Bölge, Muradiye, Erçiş, Gevaş, Özalp, Tatvan ve Ahlat istasyonlarının ortalama yağış verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilmiştir. Trend analizlerinin ve diğer istatistiksel analizlerin gerçekleştirilmesinde Trend Analysis for Windows adlı yazılım ve IBM SPSS 24 programından yararlanılmıştır. Kartografik malzemelerin hazırlanmasında ArcGIS 10.3 GIS (Geography Information System) programı kullanılmıştır.

Van Gölü kapalı havzasının 1964-2017 yıllarını kapsayan ortalama yağış parametrelerindeki eğilimlerin hangi yönde ve boyutta gerçekleştiğini ortaya koymak için çeşitli istatistiksel yöntemlerden yararlanılarak verilerin uygunluğu tespit edildikten sonra trend analizleri gerçekleştirilmiştir. Trend analiz sonuçlarından daha doğru sonuçlar elde etmek için istasyonların tercihinde en az 30 yıllık kesintisiz veri setine sahip olması dikkate alınmıştır.

İklim değişkenlerinin analizinde verilerin uygunluğu önemli bir konudur. Verilerin uygunluğuna bağlı olarak parametrik veya parametrik olmayan yöntemler istatistik işlemlerde kullanılmaktadır. Parametrik olan verilerin zaman serisinde doğrusal regresyonu ele alınırken, var olan eğilimlerin analizi için ise t-testi gibi istatistiksel yöntemler tercih edilmektedir. Ancak, Albek (1999), parametrik eğilim analizlerinde iki temel sorun ile karşılaşmaktadır. Analiz sonuçlarında elde edilen model ve gözlem verileri arasındaki farkların normal dağılmış ve sabit varyanslı olması beklenir. Veri setlerinde uç değerlerin varlığına bağlı olarak, parametrik istatistiksel metodlarda oldukça problem oluşturabilmektedir, şeklinde ifade etmiştir. Benzer durumlarla karşılaşılması adına nonparametrik yöntemler günümüzde en çok tercih edilenler arasındadır. Parametrik olmayan yöntemler verilerin sıralamasını dikkate aldığı için verilerdeki eksiklerden etkilenmemeye özelliğine sahiptir. Belirtilen özelliği nedeniyle en çok kullanılan yöntemlerdir. İklim verileri kısa zaman serilerinde hızlı değişimler göstermekte ve sabit kalmamaktadır. Bu özelliği nedeniyle iklim parametreleri homojen dağılım göstermemektedir. Bu özelliğinden dolayı non-parametrik yöntemler ile analiz edilmesi daha gerçek sonuçlar sunmaktadır. Bu nedenle homojenlik testine gereksinim duyulmamıştır. Sosyal Bilimler alanında son yıllarda yapılan araştırmalarda en çok tercih edilen non-parametrik yöntemlerin başında Mann-Kendall, Spearman'ın Rho'su Trend testleri gelmektedir. Bu yöntemler, yüksek tutarlılık seviyelerinden dolayı Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından önerilen istatistiksel yöntemlerdir. Çalışma kapsamında bu testler tercih edilmiştir. Mann-Kendall ve Spearman'ın Rho test analiz sonuçlarında Z kritik değer  $\pm 1,96$  güven aralığında kaldığında eğilim görülmezken, bu değer altına ya da

üstüne çıktığında ise eğilim olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca ülkemizin yetiştirdiği bilim insanlarından Prof. Dr. Zekai Şen'in bilim dünyasına kazandırdığı "**Şen Eğilim Metodu**"da araştırmada uygulanmıştır.

### **Mann-Kendall Testi (Mann-Kendall Test)**

Mann-Kendall, Kendall's Tau trend analizi olarak bilinen testin özel bir uygulamasıdır. Hidroklimatolojik non-parametrik verilerin kullanılmasından tercih edilen bir testtir. Var olan değişkenlerin yönü ve şiddetini belirlemede genel olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemde peşi sıra dizilmiş verilerin analizinde kullanılmaktadır (Burn, 2002). Bu yöntemde zaman serisinde sıralanmış  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  serilerin  $H_0$  sıfır hipotezine veriler zamana bağlı olmaksızın rastgele benzer dağılım göstermiş değişkenlerdir.  $H_1$  alternatif hipotezine göre ise  $(k \neq j)$  ve  $n \geq k, j$  olmak üzere seride  $X_k$  ve  $X_j$  ardışık verilerin zaman serisinde dağılımı benzerlik göstermemektedir. Bunun sonucunda verilerde lineer bir eğilim var demektir. Mann-Kendall testinin test istatistiği  $S$  şöyle bulunmaktadır.

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} (x_j - x_k) > 0 \Rightarrow +1 \\ (x_j - x_k) = 0 \Rightarrow 0 \\ (x_j - x_k) < 0 \Rightarrow -1 \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2)$$

Normal bir dağılım gösteren veriler ve ortalaması sıfır olan test istatistiği  $S$ 'in varyansı, aşağıdaki formülle bulunmaktadır.

$$\text{Var}(S) = \frac{n*(n-1)*(2n+5)}{18} \quad (3)$$

Var olan zaman serisindeki verilerde benzerlik olması durumunda, verilerin hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (4)$$

Hesaplanan veri setlerinde elde edilen sonuçlar, standart normal değişkenler hesaplanarak kritik değişken olan  $z$  ile karşılaştırılır.

$$z = \begin{cases} S > 0 \Rightarrow \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \\ S = 0 \Rightarrow 0 \\ S < 0 \Rightarrow \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \end{cases} \quad (5)$$

Mann-Kendall test analizinden sonra elde edilen sonuçlar eğer pozitif ise artan, negatif ise azalan yönde trend var demektir (Gümüş ve Yenigün, 2006; Yılmaz, 2018; Gözalan, 2019).

### **Spearman'ın Rho Testi (Spearman Rho Test)**

Spearman'ın Rho testi, iki parametre arasında var olan korelasyonu belirlemek için tercih edilen bir yöntemdir. Kullanışlı ve basit olmasından dolayı var olan eğilimlerin belirlenmesinde en çok tercih edilen yöntemlerden bir tanesidir. Sıra istatistiğini ifade eden  $R_{xi}$ 'nin tespiti parametlerin büyükten küçüğe veya küçükten büyüğe doğru sıralanmasıyla gerçekleşir. Spearman'ın Rho testi istatistiğini  $r_s$  ilişki değerleri aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Gümüş, 2006). Bu analiz yönteminde  $x_i$  sayısal değerlerinin ( $i=1, \dots, n$ 'e kadar) yerine veriler küçükten büyüğe ard arda sıralanmasıyla oluşturulan dizideki sıra numaraları kullanılmaktadır (Türkeş, 2013).  $r_s$  ilişki katsayısı,

$$r_s = 1 - 6 \frac{[\sum_{i=1}^n (R(X_{i-1}))^2]}{n^3 - n} \quad (6)$$

formülü ile bulunmaktadır.

rs dağılımı  $n > 30$  olması durumunda normale yaklaşıyor demektir. Bu durumda rs istatistik analizleri için normal bir dağılım gösteren tablolardan yararlanılmaktadır. rs' nin test istatistiğine karşılık gelen Z değeri şöyle hesaplanmaktadır (Gümüş, 2006).

$$Z = r_s \sqrt{n - 1} \quad (7)$$

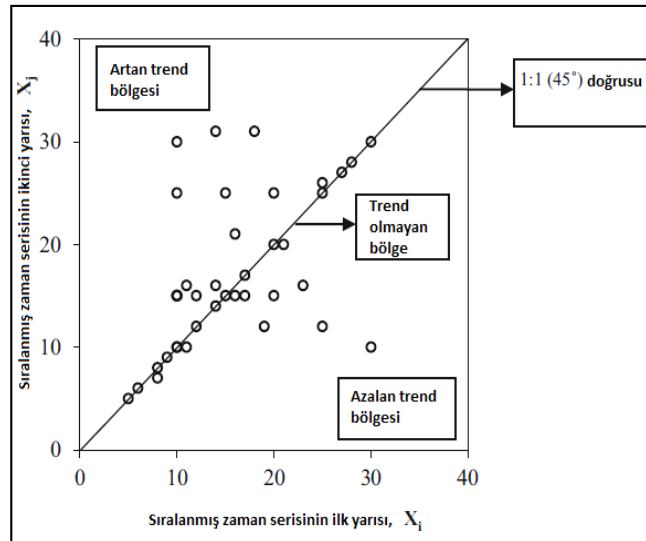
Denklemdaki hesaplamalar yapıldıktan sonra, elde edilen Z  $\alpha$  önem seviyesinde standart normal dağılım tablolarında gösterilen  $Z_{\alpha/2}$  değerinden daha büyük olması durumunda artış ya da azalış yönünde eğilimlerin olduğunu göstermektedir.

Analiz ile elde edilen sonuçlarda var olan eğilimlerin anlamlı olup olmaması son derece önemlidir. Sonuçların anlamlı olması için;  $r_s > 0$  olması durumunda eğilimin artış,  $r_s < 0$  ise eğilimin yönünde olduğu sonucuna varılmaktadır (Türkeş, 2013).

### Şen Testi (Sen Test)

Kayı tutulmuş meteorolojik veri serisi ortanca yıldan iki eşit yarıya ayrılır. Her iki alt-seri ayrı ayrı artan düzende sıralanır. Sonrasında ise ilk alt-seri ( $X_i$ ) X-ekseni üzerinde ve ikinci alt seri ( $X_j$ ) Y-ekseni üzerinde yer almak üzere Kartezyen koordinat sistemi üzerinde sıralanır. Eğer veri 1:1 doğrusunun üzerinde sıralanıyorsa, trend yok demektir. Eğer veriler 1:1 doğrusunun alt üçgen alanında yer alıyor ise, azalan bir trend olduğu; üst üçgen alanında yer alıyorsa, artan bir trend olduğu söylenebilir (Şen, 2012, 2013).

Şen'in yönteminin yenilikçi özelliği bütün veri aralıklarında yorumlanabilmesinde yatar. Bu metot, Şen tarafından (2013) Merkez/Bursa, Uludağ/Bursa, Fırat Nehri üzerinde, aynı metot, yine Şen tarafından (2012) Aslantaş Barajı, Menzelet Barajı ve Cizre istasyonunda, son olarak da Göztepe, Florya, Edirne, Bolu ve Bursa lokasyonlarındaki kaydedilmiş uzun dönemli sıcaklık verilerinin üzerinde uygulanmıştır, Şekil.1 (Şen, 2013; Yıldırım, 2015).



Şekil 2. Şen Metodu (Şen Method)

## 4. Araştırma Bulguları (Experimental Results)

Van Gölü Havzasındaki istasyonların ortalama yağış parametrelerindeki eğilimleri belirlemek amacıyla 1964-2017 yıllarını kapsayan veriler Mann-Kendall, ve Spearman'ın Rho'su Trend Eğilim testleri uygulanarak elde edilen bulgular Tablo 1'de verilmiştir.

Yıllık ortalama yağış değerlerinde Gevaş ve Ahlat istasyonlarında negatif eğilimler kuvvetli olup istatistiki açıdan anlamlılık ifade etmektedir. Erciş, Muradiye, Özalp ve Tatvan istasyonlarında negatif, Van-Bölge istasyonunda ise pozitif eğilimler görülmekte olup bu eğilimler istatistiki açıdan anlamlılık ifade etmemektedir.

**Tablo 1:** Van Gölü Havzasının Ortalama Yağış Verilerinin Mann-Kendall ve Spearman Testi Analiz Sonuçları (1964-2017)  
(Mann-Kendall and Spearman Test Analysis Results of Average Precipitation Data of Van Lake Basin "1964-2017")

Metod	Mann-Kendall ve Spearman'ın Rho's				
	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış	Yıllık
Van-Bölge	1,50	0,01	0,86	0,42	1,25
Erciş	<b>-2,71</b>	<b>-2,37</b>	<b>-3,57</b>	<b>-3,8</b>	-1,76
Gevaş	-1,11	<b>-2,78</b>	<b>-2,95</b>	-1,39	<b>-2,07</b>
Muradiye	0,00	0,33	-0,78	<b>-2,6</b>	-0,45
Özalp	-1,52	<b>-3,42</b>	-1,26	-1,23	-0,7
Ahlat	<b>-2,60</b>	<b>-2,74</b>	<b>-3,57</b>	<b>-3,27</b>	<b>-2,28</b>
Tatvan	0,61	0,00	-1,72	-0,81	-0,57

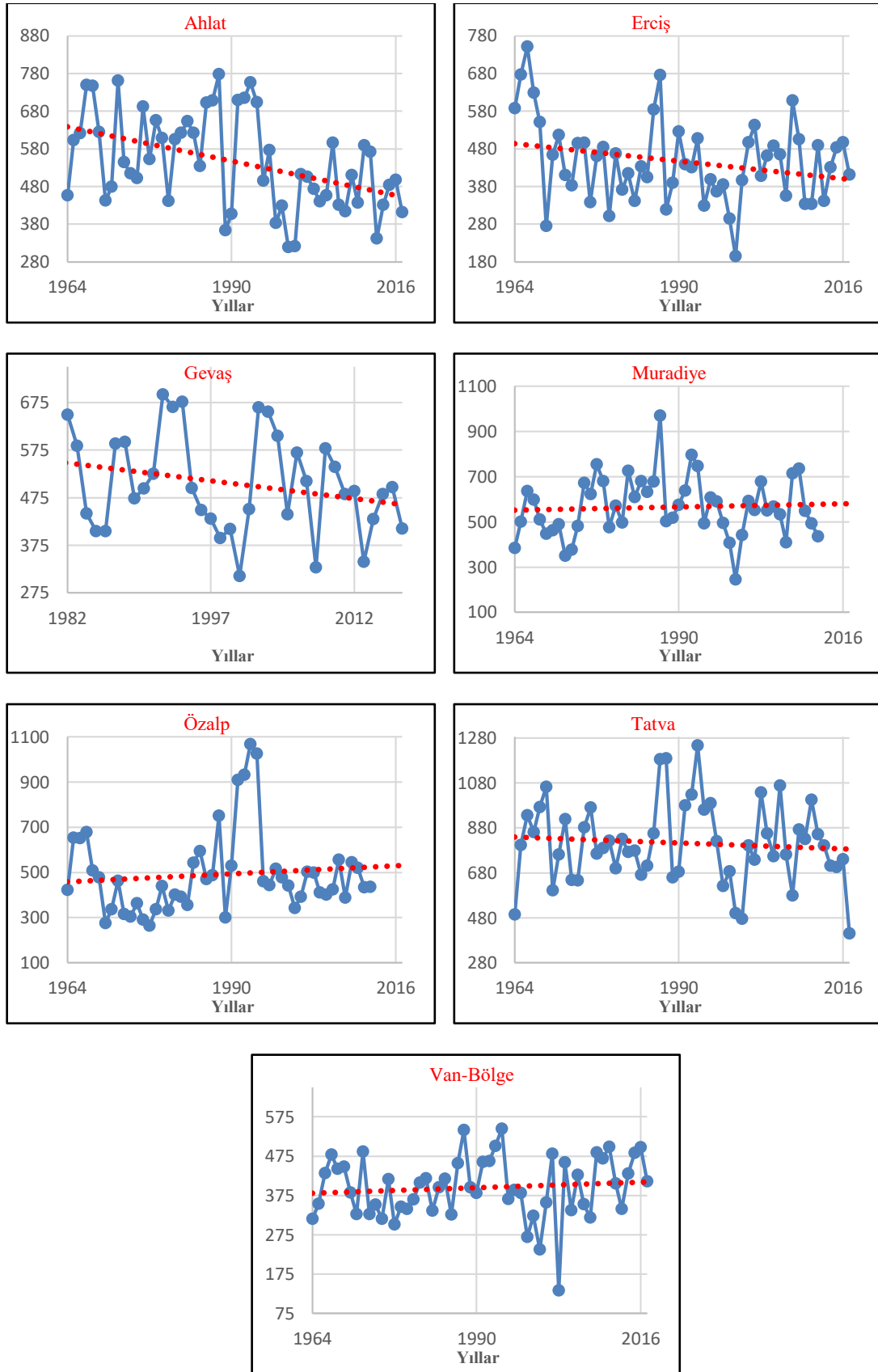
\* %95 ( $\alpha=0.05$ ) güven aralığında anlamlılık seviyesi belirtmektedir.

Mevsimlik yağış bulguları incelendiğinde, ilkbahar mevsiminde Ahlat ve Erciş istasyonlarında kuvvetli negatif yönlü eğilimler saptanmıştır. Geriye kalan istasyonlarda (Gevaş, Van-Bölge ve Özalp) var olan eğilimler ise anlamlılık göstermemektedir. Yaz mevsiminde Erciş, Gevaş, Özalp ve Ahlat istasyonlarında kuvvetli negatif yönlü eğilimler görülürken, Van-Bölge, Muradiye ve Tatvan istasyonlarında ise var olan eğilimler istatistiki açıdan anlamlılık ifade etmemektedir. Güz döneminde Erciş, Gevaş ve Ahlat istasyonlarında istatistiki açıdan kuvvetli negatif eğilimler saptanmıştır. Diğer istasyonlardaki eğilimler anlamlılık ifade etmemektedir. Kış döneminde Erciş, Muradiye ve Ahlat istasyonlarında negatif eğilimler görülürken geriye kalan istasyonlardaki eğilimler anlamlılık göstermemektedir.

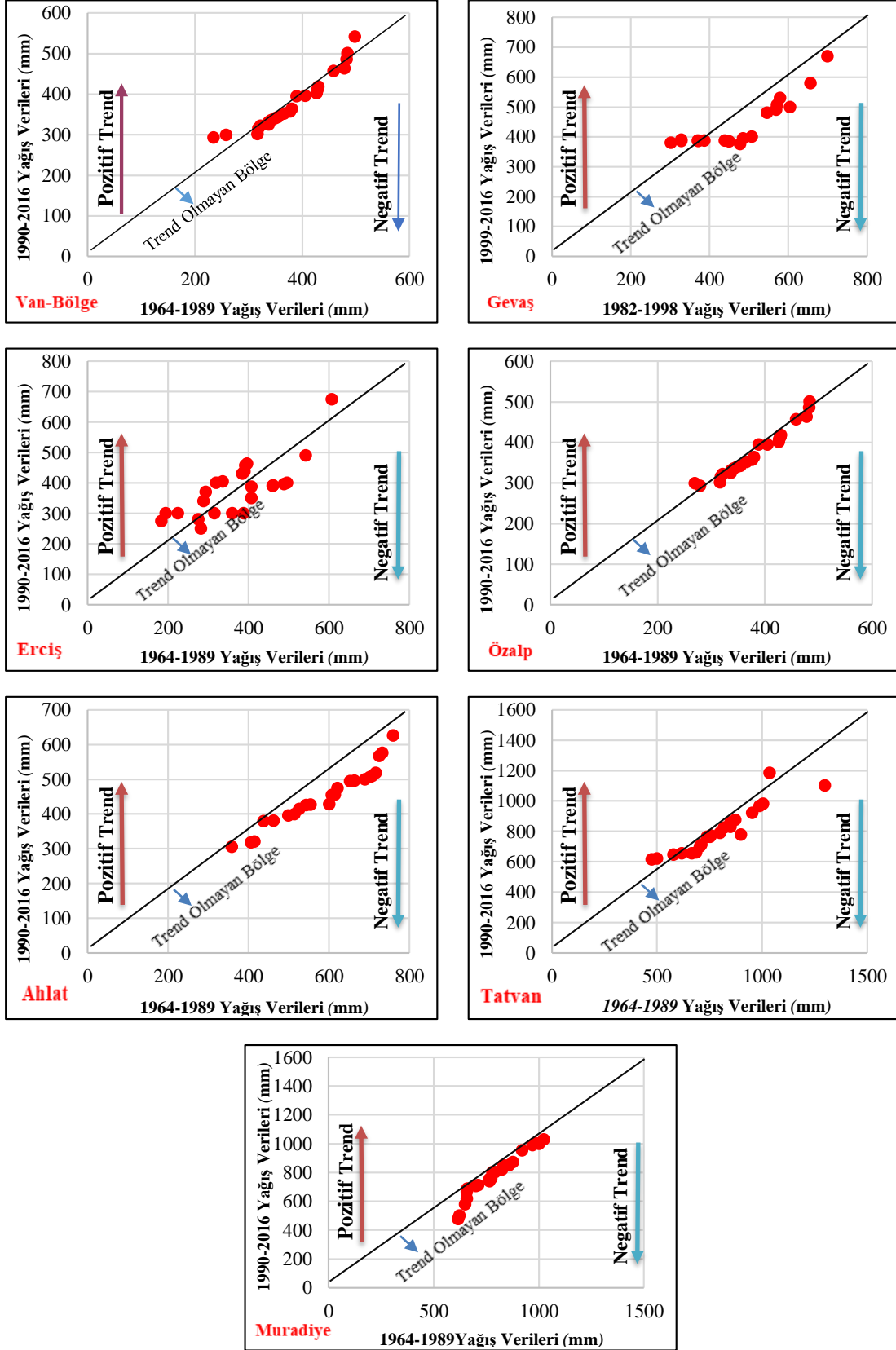
Van Gölü Havzasında yıllık ortalama yağışların eğilim yönleri Şekil 2'de görüldüğü üzere genel olarak negatif yönlü eğilimlerin olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 3'te Şen trend analiz metoduna göre elde edilen yıllık trend bulguları; Van Gölü Kapalı havzasındaki yağış değerlerinde Gevaş ve Ahlat istasyonlarında yağışlarda anlamlı azalışların olduğu fakat diğer istasyonlarda ise anlamlı eğilimlere rastlanmadığı sonucuna varılmıştır. Elde edilen değerler Mann Kendall ve Spearman Rho test istatistiklerindeki sonuçlar ile de örtüştüğü görülmektedir. Gevaş ve Ahlat istasyonlarında değerlerin 1:1 doğrusundan saptığı ve eğilim yönünün negatife döndüğü gözlenmektedir. Fakat geriye kalan istasyonlardan Van-Bölge istasyonunda anlamlı olmayan artışlara, diğer istasyonlarda ise anlamlı olmayan azalışlara rastlanması değerlerin 1:1 doğrusuna çok yakın olmasından anlaşılmaktadır. Yani, belirtilen istasyonlarda belirli bir eğilim yönünün tam olarak olmadığı söylenebilir.





**Şekil 3.** Van Gölü Havzasındaki İstasyonların Ortalama Yağışların Eğilim Yönleri (1964-2017) (Trend Direction of Average Precipitation of the Stations in Van Lake Basin "1964-2017")



Şekil 4. Şen Eğilim Testine Göre Yağış Değerlerinin Trend Yönleri (Trend Directions of Precipitation Values According to Sen Trend Test)

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Van Gölü Havzasında bulunan 7 istasyonun bulgularına göre 1964-2017 yılları arasını kapsayan 53 yıllık periyotta yıllık ve mevsimlik ortalama yağış verileri incelenerek Mann Kendall ve Spearman Rho test istatistiklerindeki sonuçlar verilmiştir (Tablo 2).

**Tablo 2.** Çalışma alanındaki istasyonların mevsimlik ve yıllık yağış eğilimleri (1964-2017) (Seasonal and annual precipitation trends of stations in the study area “1964-2017”)

Metod	Mann-Kendall ve Spearman'ın Rho's				
	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış	Yıllık
Van-Bölge	↑	↑	↑	↑	↑
Erciş	↓	↓	↓	↓	↓
Gevaş	↓	↓	↓	↓	↓
Muradiye	●	●	●	↓	↓
Özalp	↓	↓	↓	↓	↓
Ahlat	↓	↓	↓	↓	↓
Tatvan	●	●	↓	↓	↓

↑: İstatistiki açıdan anlamlı Negatif Azalış / Pozitif Artış ↓: İstatistiki açıdan anlamlı olmayan Negatif Azalış ve Pozitif Artış Trend Yok ●

1964-1917 periyodunda Van Gölü Havzasının ortalama yağış bulgularına göre; Mevsimlik olarak Van-Bölge ve Tatvan istasyonlarında var olan eğilimlerin istatistiki açıdan anlamlı olmadığı tespit edilmiştir, diğer istasyonlardan Ahlat ve Erciş'te dört mevsimde negatif, Gevaş'ta ise yaz ve sonbahar; Muradiye istasyonunda ise sadece kış mevsiminde istatistiki açıdan anlamlı negatif yönlü eğilimlerin olduğu görülmektedir. Özalp istasyonunda ise sadece anlamlı yağış azlığı yaz mevsimindedir.

Yıllık yağış değerlerinde ise Gevaş ve Ahlat istasyonlarında anlamlı negatif eğilimler görülürken, diğer istasyonlarda ise var olan yağış eğilimleri istatistiki açıdan anlamlılık ifade etmemektedir.

Şen eğilim metoduna göre yıllık olarak incelenen yağış trendleri, Van Gölü kapalı havzasındaki Gevaş ve Ahlat meteoroloji istasyonlarında negatif eğilimlerin olduğunu doğrulamaktadır. Diğer istasyonlardan Van-Bölge istasyonunda anlamlı olmayan yağış artışları gözlenirken havza genelindeki diğer istasyonlarda ise anlamlı olmayan negatif eğilimler tespit edilmiştir.

Emek (2014) Doğu Anadolu Bölgesi'nde yaptığı çalışmasında; 28 adet yağış gözlem istasyonunda azalan yönde bir eğilim, 10 adet yağış gözlem istasyonunda da artan yönde anlamlı olmayan bir eğilim gözlemiştir. Doğu Anadolu Bölgesi'nin kuzey kesimlerinde genellikle pozitif yönde trend görülürken, güney ve batı kesimlerinde negatif yönde trend tespit edildiğini belirtmiştir.

Yukarıda anlatılan sonuçlara göre havza genelinde anlamlı ya da anlamlı olmayan yağış azlığı eğilimi havzada kuraklık açısından bir riskin olduğunu göstermektedir. Keskin vd. (2018) çalışmalarında; Türkiye'nin iklim değişimlerinin yaşanabileceği riskli ülkelerden birisini oluşturmakta olduğunu, özellikle de ülkemizin doğu kesiminin iklim değişikliklerine çok duyarlılık gösterdiğini ve Doğu Anadolu Bölgesi'nin kuraklık açısından bir risk taşıdığını ileri sürmüşlerdir.

Kuraklık riski, göl seviyesinde meydana gelen değişimlerde sadece tektonik etkilerin değil, küresel iklim değişikliğinden kaynaklı yerel iklim parametrelerindeki değişimlerin de etkisinden söz edilebilir. Gelecekte iklim, tektonik kadar olmasa da göl seviye değişiminde tekrar etkili bir faktör olacağı benzetilmektedir. Aydın ve Doğu (2018) çalışmalarında; son yıllarda tüm dünyada olduğu gibi Van Gölü'nde de küresel iklim değişikliğine bağlı olarak az da olsa seviyede dalgalanmalar meydana gelmiştir. Küresel ısınma sonucunda yaşanan su kaybı sığ göllerde daha fazla iken derin göllerde daha azdır. Dolayısıyla Van Gölü gibi hem derin hem de alansal olarak büyük olan bir gölde küresel ısınmanın etkileri daha az hissedilmektedir, düşüncesini paylaşmışlardır.

Yine Türkeş'e göre Türkiye'de yağış değişimleri konusunda yaptığı çalışması incelendiğinde, yıllık yağışların azalma eğiliminde olduğu ve kurak dönemlerin 1970 sonrası arttığı ve gittikçe şiddetlendiği belirtilmektedir (Türkeş, 1996). Ayrıca, yağışlar kuzey yarımkürenin orta ve yüksek enlemlerinde her on yılda yaklaşık %0,5 ile

%1 arasında artışa sahipken, Akdeniz havzasının da içinde olduğu subtropikal karaların önemli bir bölümünde her on yılda yaklaşık olarak %3 azalma eğilimi görülmektedir (Türkeş vd., 2007).

Araştırma alanı, yukarıda belirtilen küresel ve yerel şartların etkisinde kalacağı ve küresel anlamda Akdeniz havzası ülkeleri, dolayısıyla ülkemiz için öngörülen senaryoların zaman içerisinde etkisinin gözleneceği olasıdır. Ancak belirtilen sonuçları kuvvetlendirecek çok daha güçlü kanıtlara da gereksinimin olduğu düşünülmektedir. Dünya da ve ülkemizde 1950 sonrası yaşanan hızlı şehirleşme ile meteorolojik istasyonların şehir hapsinde kalması ölçümlerin istemsiz manipülasyona uğramasına neden olabilir. Bu yüzden iklim çalışmalarının güçlü dayanaklarla temellendirilmesi; başka kanıtlara, veri kalitesini artırıcı unsurlara, başka ölçümlere ve çok parametrelili araştırmalara ihtiyaç duyulmakta olduğu göz ardı edilmemelidir.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

### Kaynaklar (References)

- Ackerman, S. A. ve Knox, J. A. 2015. Meteoroloji Atmosferimizi Anlamak, Çeviri Ed. Mikdat Kadioğlu-Sedef Çakır, Nobel Yayınları, Ankara.
- Akköprü, E. 2019. Nemrut Volkanizması'nın Van Gölü Güneybatısındaki Akarsu Sistemleri Üzerindeki Etkileri, Sosyal Bilimlerde Akademik Araştırmalar Kitabı, Ed. Zeki Taştan, Zeki Duman, Güler Yılmaz, Hiper Yayın, 205-222.
- Aksoy, B. ve Coşkun, M. 2010. Global Climate Change and Its Effects on Turkey. EKEV Academic Review "Social Sciences", 42, 367-382, Erzurum.
- Aktaş, S., Kalyoncuoğlu, U. Y., Anadolu Kılıç, N.C., 2018. Eğirdir Göl Havzasının De Martonne Yöntemi ile Kuraklık Analizi, Journal of Engineering Sciences and Design, 6(2), 229 – 238.
- Altan Aydın, F. 2017. Van Gölü Seviye Değişimleri ve Kıyıları Üzerindeki Etkileri, Van: Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi).
- Addisu, S., Selassie, Y.G., Fissaha, G. ve Gedif, B. (2015). Time series trend analysis of temperature and rainfall in lake Tana Sub-basin, Ethiopia, Environmental Systems Research, pp. 4:25, Springer.
- Asfaw, A., Simane, B., Hassen, A. ve Bantider, A. (2017). Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: A case study in Woleka sub-basin, Weather and Climate Extremes, pp.1-13, Elsevier.
- Avşaroğlu, Y. (2019). Dicle Havzası Aylık Ortalama Akım Değerlerinin Trend Analizi, H.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- Aydın, F. A. Ve Doğu, A. F. 2018. Göllerde Seviye Değişimleri ve Nedenleri: Van Gölü Örneği, 100. Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Sayı:41, sf:183-208, Van.
- Blumenthal, M.M., Van der Kaaden, G., ve Vlodavetz, V.I., 1964. Catalogue of the active volcanoes of the World including solfatara fields. Part XVII Turkey and the Caucasus. International Association of Volcanology, 17, 1-23.
- Burn, DH ve Elnur, MAH. 2002. Hidrolojik trendlerin tespiti ve değişkenlik. Hidroloji Dergisi, 255 (1-4), 107-122.
- Coşkun, M. 2011. Fundamental pollutants in the European Union (EU) countries and their effects on Turkey. Elsevier, Procedia Social and Behavioral Sciences, 19, 467-473.
- Coşkun, M. 2019. İklim Değişimleri ve Küresel Isınma, 12. Bölüm, Yer Bilimi Kitabı, Ed. Mete Alim-Serkan Doğanay, Pegem Akademi, Ankara.
- Coşkun, M., Aksoy, B. 2007. 19 Haziran 2004 Çubuk-Sünlü (Ankara) Hortum Olayı, Doğu Coğrafya Dergisi, 12(17), 203-222, Erzurum.
- Coşkun M., Akbaş V. 2017. Karadeniz Kıyısından İç Kesime: Kastamonu Çevresinin İklim Parametreleri, Sosyal Bilimler Dergisi, The Journal of Social Science, Yıl: 4, Sayı:11, Haziran 2017, s. 46-86.
- Coşkun, S. 2020a. Tuz Gölü-Konya Kapalı Havzaları'nda Ortalama Sıcaklık, Yağış Ve Akım Verilerinin Trend Analizi, Coğrafya Araştırmaları, Kitap Bölümü, 1. Bölüm, sf:1-13, Akademisyen Yayınevi (AYBAK), Ankara.
- Coşkun, S. 2020b. Trend Analysis of Mean Temperatures Data in Van Lake Closed Basin, Turkey, Current Studies in Social Sciences, Chapter of Book, 3. Chapter, pp:43-51, Akademisyen Yayınevi (AYBAK), Ankara
- Degens, E. T., Wong, H. K., Kempe, S., ve Kurtman, F., 1984. A geological study of Lake Van, eastern Turkey. Geologische Rundschau, 73-2, 701-734.
- Emek, M.F., 2014. Doğu Anadolu Bölgesi Yıllık ve Aylık Toplam Yağışların Trend Analizi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Erlat, E., 2013. İklim Sistemi ve İklim Değişimleri, Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir.
- Gözalın, S., 2019. Yüzey, 850, 700 ve 500 hPa Basınç Seviyelerinde Sıcaklık İle Nem Parametrelerinin Karşılaştırmalı Trend Analizi: Türkiye Örneği. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Karabük.
- Gümüş, V. 2006. Fırat Havzası Akımlarının Trend Analizi İle Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gümüş, V., ve Yenigün, K., 2006. Evaluation of Lower Fırat Basin Streamflow by Trend Analysis. In 7th International Advances in Civil Engineering Conference, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey.
- Kadioğlu, M. 1997. Trends Surface Air Temperature Data Over Turkey", International Journal of Climatology, 17, 511- 520.
- Kadioğlu, M., Öztürk, N. ve Şen, Ş., 1999. On the precipitation climatology of Turkey by harmonic analysis, International Journal of Climatology, C. 19, ss. 1717-1728.

- Kamruzzamana, M., Beechama, S., ve Metcalfe, A. 2016. Estimation of trends in rainfall extremes with mixed effects models. *Atmospheric Research*, 168, 24-32.
- Karabulut, M. ve Cosun, F. 2009. Kahramanmaraş İlinde Yağışların Trend Analizi, *Coğrafi Bilimler Dergisi*, CBD 7(1), 65-83.
- Karaosmanoğlu, F., Günek, H., 2018. Göksu Havzası'nda Buharlaştırma ve Yüzeysel Akışın Penman ve Thourthwaite Yöntemlerine Göre Değerlendirilmesi. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 4(10),599-614.
- Kempe, S., Khoo, F., ve Gürleyik, Y., 1978. Hydrography of Lake Van and its drainage area. In: *The Geology of Lake Van*, E.T. Degens and F. Kurtman (eds.), *The Mineral Research and Exploration Institute of Turkey (MTA) Publication No.169*, pp. 30-44.
- Keskin M.E., Çakto İ., Çetin V., Bektaş O., 2018. Doğu anadolu Bölgesi Sıcaklık ve Yağış Trend Analizi, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(2), 294-300.
- Kızılelma, Y., Çelik, M. A., ve Karabulut, M., 2015. İç Anadolu Bölgesinde sıcaklık ve yağışların trend analizi. *Türk Coğrafya Dergisi*, (64), İstanbul.
- Lazaro, R., Rodrigo, F.S., Gutierrez, L., Domingo, F. ve Puigdefabregas, J., 2001. Analysis of a 30-year rainfall record (1967-1997) in semi-arid SE Spain for Implications on Vegetation, *Journal of Arid Environment*, 48, 373- 395.
- Nourani, V., Mehr, A. D. ve Azad, N., 2018. Trend Analysis Of Hydroclimatological Variables İn Urmia Lake Basin Using Hybrid Wavelet Mann– Kendall And Şen Tests. *Environmental Earth Sciences*, 77(5): 207.
- Polat, P. ve Sunkar, M., 2017. Rize'nin İklim Özellikleri ve Rize Çevresinde Uzun Dönem Sıcaklık ve Yağış Verilerinin Trend Analizi, *F.Ü. Sosyal Bilimler Dergisi*, Cilt:27, Sayı:1, Sayfa:1-23, Elazığ.
- Rahman, M. A., Yunsheng, L. Ve Sultana, N., 2017. Analysis And Prediction Of Rainfall Trends Over Bangladesh Using Mann– Kendall, Spearman's Rho Tests And ARIMA Model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 129(4): ss.409-424.
- Soydan, N.G., Gümüş, V., Şimşek, O., Gerger, R. ve Ağun, B., 2016. Seyhan Havzası Aylık Ortalama Akım ve Yağış Verilerinin Trend Analizi, *D.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergisi*, c.7, s.2, ss. 319-327, Diyarbakır.
- Sönmez, O., Çeribaşı, G. ve Doğan, E., 2016. Short And Long Term Streamflow Prediction By Different Neural Network Approaches And Trend Analysis Methods: Case Study Of Sakarya River, Turkey. *Fresen. Environ. Bull*, 25: ss.565-579.
- Şapolya, D., 2017. Ege Bölgesi sıcaklık Verilerinin Bölgesel Ortalama Menn Kendall Testi ile Trend Analizi, *Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.*
- Şaroğlu, F., ve Yılmaz, Y., 1986. Doğu Anadolu'da neotektonik dönemdeki jeolojik evrim ve havza modelleri. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 107, 73-94.
- Su, L., Miao, C., Kong, D., Duan, Q., Lei, X., Hou, Q. ve Li, H. (2018). Longterm Trends İn Global River Flow And The Causal Relationships Between River Flow And Ocean Signals. *Journal of Hydrology*, 563: ss. 818-833.
- Şen, C. 2013. Isparta İlinde Sıcaklık ve Yağış verilerinin Trend Analizi, *Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Fiziki Coğrafya Anabilim Dalı, Isparta.*
- Şen, Z. 2012. Innovative trend analysis methodology. *J. Hydrol. Engineering*, 17(9), 1042- 1046.
- Şen, Z. 2013. Trend identification simulation and application. *J. Hydrol. Engineering* doi: 10.1061/(ASCE) HE 1943-5584.0000811.
- Şener, E., Şener, Ş., 2019. Meteorolojik Kuraklığın Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Zamansal ve Konumsal Analizi: Çorak Gölü Havzası (Burdur-Türkiye) Örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 596-607.
- Şenocak, S. ve Emek, M. F., 2019. Trend Analizi Yöntemleri Kullanılarak Doğu Anadolu Bölgesi Aylık Yağış Miktarlarının Değerlendirilmesi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Sayı: 17, Sayfa:807-822.
- Tayanç, M., Karaca, M. ve Yenigün, O., 1997. Annual and Seasonal Air Temperature Trend Patterns of Climate Change and Urbanization Effects in Relation to Air Pollutants in Turkey, *Journal of Geophysical Research*, 102, 1909-1919.
- Tosic, I. ve Ukasevic, M., 2005. Analysis of Precipitation Series for Belgrade, *Theoretical and Applied Climatology*, 80, 67- 77.
- Toros, H., 1993. Klimatolojik serilerden Türkiye ikliminde trend analizi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, yayımlanmamış yüksek lisans tezi.*
- Türkeş, M., 1996. Spatial and temporal analysis of annual rainfall variations in Turkey, *International Journal of Climatology*, C. 16, ss. 1057-1076.
- Türkeş, M., 2012. Türkiye'de Gözlenen ve Öngörülen İklim Değişikliği, Kuraklık ve Çölleşme. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 1-32.
- Türkeş, M., 2013. Klimatolojik Ve Hidrolojik Verilerin İklimsel Değişkenlik Analizi, *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Coğrafya Bölümü Fiziki Coğrafya Anabilim Dalı, Yayımlanmamış Ders Notları, Çanakkale.*
- Türkeş, M., Sümer, M., U. ve Kılıç, G., 1995. Variations and trends in annual mean air temperatures in Turkey with respect to climatic variability, *International Journal of Climatology*, C.15, S. 5, ss. 557-569.
- Türkeş, M., Koç, T. ve Sarı, F., 2007. "Türkiye'nin Yağış Toplamı ve Yoğunluğu Dizilerindeki Değişikliklerin ve Eğilimlerin Zamansal ve Alansal Çözümlemesi", *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 3, 57-73.
- Türkeş, M., Koç, T. ve Sarı, F., 2009. Spatiotemporal variability of precipitation total series over Turkey, *International Journal of Climatology*, C. 29, S.8, ss.1056-1074.
- Wong, H.K., ve Finckh, P., 1978. Shallow structures in Lake Van. In: *The Geology of Lake Van*, E.T. Degens and F. Kurtman (eds.), *The Mineral Research and Exploration Institute of Turkey (MTA) Publication, No.169*, pp. 20-28.
- Yenigün, K., Gümüş, V. ve Şimşek, O., 2013. Seyhan Havzası Gidişlerinin Analizi, VII. Ulusal Hidroloji Kongresi 26 -27 Eylül 2013, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Yıldırım, A., 2015. Trend Analizi Yöntemleri: Orta Fırat Havzası Uygulaması, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, Enerji Enstitüsü, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.*
- Yılmaz, A., 2018. Batı Karadeniz Bölümünde Sıcaklık ve Yağış Verilerinin Trend Analizi. *Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Karabük.*



## EMPEDANS FAKTÖRÜ KULLANILARAK KONSOLİDASYON DENEYİNDE KULLANILAN GÖZENEKLİ TAŞLARIN GEÇİRİMLİLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mustafa ÖZER<sup>1\*</sup>, Nurcan BAKDI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Karayolları 4. Bölge Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Konsolidasyon Deneyi,  
Gözenekli Taş,  
Empedans Faktörü,  
Geçirimsizlik,  
Killi Zemin.*

### Öz

Bu çalışmada, konsolidasyon deneyinde kullanılan gözenekli taşların geçirimsizlik katsayıları ölçülmüş ve ASTM D2435 (2011)'de tanımlanan empedans faktörü kullanılarak bu taşların hangi tür zeminler için uygun olabileceği değerlendirilmiştir. Gözenekli taşların geçirimsizliği iki farklı yaklaşımla değerlendirilmiştir. Birinci yaklaşımda, gözenekli taşların empedans faktörünün 100'den büyük olmasını sağlayacak zeminlerin geçirimsizlik katsayıları hesaplanmış ve bu taşların hangi tür zeminler için uygun olabileceği belirlenmiştir. İkinci yaklaşımda ise literatürde bulunan zeminlere ait tipik geçirimsizlik katsayıları kullanılarak gözenekli taşların empedans faktörleri hesaplanmış ve hesaplanan değerlerin 100'den büyük olup olmadığına bakılarak hangi tür zeminler için uygun olabileceği değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, çeşitli kamu kurumlarından ve üretici firmalardan temin edilen 7 farklı gözenekli taş kullanılmıştır. Yapılan ölçümler ve hesaplamalar sonucunda çalışmada kullanılan tüm taşların killi ve siltli-killi zeminlerin konsolidasyon deneyi için uygun olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, ASTM D2435 (2011)'de tanımlanan empedans faktörünün konsolidasyon deneyinde kullanılan gözenekli taşların geçirimsizliğinin değerlendirilmesinde oldukça faydalı sonuçlar verdiğini göstermiştir.

## EVALUATION OF THE PERMEABILITY OF POROUS STONES USED IN THE CONSOLIDATION TEST BY USING THE IMPEDANCE FACTOR

### Keywords

*Consolidation Test,  
Porous Stone,  
Impedance Factor,  
Permeability,  
Clayey Soil.*

### Abstract

In this study, the permeability coefficients of the porous stones used in the consolidation test were measured and for which types of soils these stones would be suitable is evaluated by using impedance factor defined in ASTM D2435 (2011). The permeability of porous stones was evaluated with two different approaches. In the first approach, the permeability coefficients of the soils that will make the impedance factor of porous stones greater than 100 is calculated and for which soils these stones may be suitable. In the second approach, the impedance factors of porous stones were calculated by using the typical permeability coefficients of the soils derived from geotechnical literature and it was evaluated for which types of soils are suitable by taking into account whether the calculated value is greater than 100. In the experimental study, 7 different porous stones obtained from various public institutions and manufacturers are used. As a result of the measurements and calculations, it was determined that the stones used in the study are suitable for the consolidation test of clayey and silty-clayey soils. The results obtained showed that the impedance factor defined in ASTM D2435 (2011) gives very useful results in evaluating the permeability of porous stones used in the consolidation test.

### Alıntı / Cite

Özer, M., Bakdı, N., (2020). Empedans Faktörü Kullanılarak Konsolidasyon Deneyinde Kullanılan Gözenekli Taşların Geçirimsizliğinin Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 533-540.

\* İlgili yazar / Corresponding author: ozer.m@gazi.edu.tr, +90-312-202-8878

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
M. Özer, 0000-0001-6846-8441	Başvuru Tarihi / Submission Date	10.02.2020
N. Bakdı, 0000-0002-4093-8306	Revizyon Tarihi / Revision Date	10.04.2020
	Kabul Tarihi / Accepted Date	12.04.2020
	Yayın Tarihi / Published Date	25.06.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Konsolidasyon; düşük permeabiliteli ve suya doymun killi zeminlerde, uygulanan yükler nedeniyle sıkışan suyun zamanla drene olması ve artan boşluk suyu basıncının zamana bağlı olarak sönümlenmesi sonucunda meydana gelen bir hacim azalmasıdır (Budhu, 2011; Holtz, Kovacs ve Sheahan, 2015; Knappett ve Craig, 2012). Geoteknik literatüründe bu hacim azalmasına “konsolidasyon oturması” denilmektedir. Killi zeminlerde meydana gelen konsolidasyon oturmasının miktarı ve bu oturmanın gerçekleşmesi için geçen süre, mühendislik yapılarının güvenli olması bakımından önemlidir. Konsolidasyon oturmasının hesaplanması için “gerilme-şekil değiştirme”, oturmanın gerçekleşeceği sürenin hesaplanması için “şekil değiştirme-zaman” ilişkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu ilişkilerin belirlenmesi için araziden örselenmemiş numune alınıp, laboratuvarında “konsolidasyon deneyi” yapılması gerekmektedir.

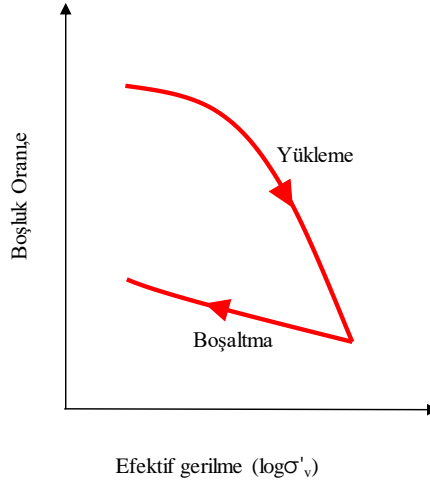
Konsolidasyon deneyinde, sondaj yapılarak UD tüpleriyle araziden alınan örselenmemiş zemin örneği laboratuvara getirilir ve hidrolik baskı yoluyla yine örselenmeden UD tüpünden çıkartılarak konsolidasyon halkasına yerleştirilir. Gerekli ölçümler alındıktan sonra konsolidasyon halkası içindeki zemin numunesiyle birlikte konsolidasyon hücresine yerleştirilir. Bu esnada konsolidasyon halkasının alt ve üst kısmına gözenekli taşlar yerleştirilir (Şekil 1). Gözenekli taş ile zemin numunesi arasına filtre (süzgeç) kağıdı yerleştirilir. Sabitleme halkası ve yük başlığı da takıldıktan sonra konsolidasyon hücresi konsolidasyon deney aletine yerleştirilir.



**Şekil 1.** Konsolidasyon deneyinde, a) gözenekli taşların yerleştirilmesi, b) numunenin konsolidasyon hücresine yerleştirilmesi (In the consolidation test, a) placing porous stones, b) placing the sample in the consolidation cell)

Konsolidasyon deney aletinde zemin numunesinin üzerine planlanan yükler uygulanır. Her yüklemeden sonra meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesi için (suyun düşey yönde hareket ederek gözenekli taşlardan geçip drene olması için) 24 saat beklenir. 24 saatin sonunda numunedeki düşey boy değişimi ölçülür ve kaydedilir. Her seferinde yük iki katına çıkartılarak yeterli sayıda (en az 4) yükleme yapılarak planlanan en yüksek basınç mertebesine çıkılır. Son basınç mertebesi yarıya veya dörtte bir düşürülerek yük boşaltılır. Her yük boşaltmasından sonra 24 saat beklenerek numunedeki boy değişimi ölçülür ve kaydedilir. Numune, halkanın içinden çıkartılır ve gerekli ölçümler alınarak deney bitirilir. Deneyin sonunda, her yükleme adımı için numune üzerine uygulanan düşey efektif gerilme ( $\sigma'$ ) ve boşluk oranı ( $e$ ) değerleri (veri çiftleri) hesaplanır ve bu değerler kullanılarak  $e$ - $\log \sigma'$  grafiği çizilir (ASTM/D2435, 2011; Holtz, Kovacs ve Sheahan, 2015; Yılmaz, Yıldırım ve Keskin, 2016). Killi zeminlerden elde edilen tipik bir  $e$ - $\log \sigma'$  grafiği Şekil 2’de verilmiştir.

Boşluk oranı-logaritmik efektif gerilme grafiği yardımıyla zeminin jeolojik geçmişi boyunca maruz kaldığı en büyük gerilme (ön konsolidasyon basıncı) ( $\sigma'_p$ ) hakkında bilgi edinilir. Bununla birlikte, sıkışma indisi ( $c_c$ ) ve kabarma indisi ( $c_s$ ) gibi parametreler de elde edilebilir. Ayrıca, konsolidasyon deneyi ile elde edilen sonuçlardan yararlanılarak her yükleme adımı için hacimsel sıkışma katsayısı da ( $m_v$ ) hesaplanabilmektedir. Konsolidasyon oturmasının hesaplanmasında kullanılan bu parametrelerin sağlıklı bir şekilde elde edilebilmesi için deneyde kullanılan gözenekli taşın uygun özelliklere sahip olması gerekir. Bu özelliklerin de başında gözenekli taşın hidrolik iletkenliği (geçirimliliği) gelmektedir. Çünkü konsolidasyonun gerçekleşmesi için zeminin gözeneklerinde bulunan suyun dışarı çıkması (drene olması), bunun için de deneyde kullanılan gözenekli taşların yeteri kadar geçirimli olması gerekmektedir.



Şekil 2. Tipik bir e-logσ' grafiği (a typical e-logσ' graphic)

Konsolidasyon deneyi için yaygın olarak kullanılan standartların başında ASTM D 2435 gelmektedir. ASTM D 2435'in ilk versiyonu 1965 yılında yürürlüğe girmiş olup, belli aralıklarla güncellenmiştir. Son zamanlardaki güncellemeler 1990, 1996, 2002, 2003, 2004 ve 2011 yıllarında gerçekleştirilmiştir. Günümüzde halen 2011 yılında güncellenen sürümü kullanılmaktadır (ASTM, 2020).

ASTM D 2435'in 2011'e kadar olan sürümlerinde gözenekli taşın geçirimsizliği ile ilgili "gözenekli taşın permeabilitesi zeminin permeabilitesinden en az bir derece daha büyük olmalıdır" ifadesi yer almaktadır.

ASTM D2435 (2011)'de ise gözenekli taşların geçirimsizliği "empedans faktörü" kavramıyla ifade edilmektedir. Empedans faktörü, gözenekli taşın hidrolik iletkenliği ile zeminin drenaj yolunun uzunluğunun çarpımının, zeminin hidrolik iletkenliği ile taşın kalınlığının çarpımına oranı olarak tanımlanmaktadır (ASTM D2435, 2011).

Bu ifade eşitlik halinde yazıldığında Eşitlik (1)'de görülen bağıntı elde edilmektedir. Bu bağıntıdan da görülebileceği gibi empedans faktörü, gözenekli taşın geçirimsizliğinin yanı sıra deneyde kullanılan zeminin geçirimsizliğine de bağlıdır.

$$E = \frac{k_{\text{taş}} \times h_{\text{dr}}}{k_{\text{zemin}} \times h_{\text{taş}}} \quad (1)$$

- $k_{\text{taş}}$  : Gözenekli taşın geçirimsizlik katsayısı (m/s)  
 $k_{\text{zemin}}$  : Zeminin geçirimsizlik katsayısı (m/s)  
 $h_{\text{dr}}$  : Zeminin drenaj yolunun uzunluğu (m)  
 $h_{\text{taş}}$  : Gözenekli taşın kalınlığı (m)

ASTM D2435 (2011)'de kesin bir ölçüt verilmemiş olmakla birlikte, gözenekli taşın uygun olabilmesi için Eşitlik (1) ile hesaplanan empedans faktörünün en az 100 veya daha büyük olması gerektiği belirtilmiştir (ASTM D2435, 2011). Bununla birlikte ASTM D2435 (2011)'de gözenekli taşın kalınlığı ile ilgili herhangi bir kısıtlama getirilmemiş, yükleme esnasında kırılmasını önleyecek kadar kalın olmasının yeterli olacağı belirtilmiştir.

Zemin mekaniği laboratuvar deneylerinden yaygın olarak kullanılan diğer bir standart olan BS 1377-5 (1990)'da gözenekli taşların geçirimsizliği "gözenekli taşların porozitesi deney numunesinin içinden serbest su akışına izin vermeli ancak gözeneklerinin içine zemin tanelerinin girmesine izin vermemelidir" ifadesiyle belirtilmektedir. Bunun haricinde BS 1377-5 (1990)'da taşların geçirimsizliği ile ilgili herhangi bir ölçüt tanımlanmamıştır.

Ülkemizde halen geçerli olan zemin mekaniği laboratuvar deneyleri standardı TS 1900-2 (2006) 'da ise gözenekli taşların geçirimsizliği ile ilgili "uygun geçirimsizlikte olmalı" ifadesi bulunmakta, ancak bu geçirimsizliğin değerlendirilmesiyle ilgili herhangi bir ölçüt verilmemektedir (TS 1900-2, 2006).

Bu çalışmada, çeşitli kamu kurumlarından ve üretici firmalardan farklı kalınlık ve farklı geçirimsizlik değerlerine sahip gözenekli taşlar temin edilmiş ve çeşitli zeminler için Eşitlik (1) kullanılarak bu taşların hangi zeminler için uygun olabileceği değerlendirilmiştir. Gözenekli taşların geçirimsizlik katsayıları bu çalışma kapsamında ölçülmüş, zeminlerin geçirimsizlik katsayıları ise literatürde bulunan katalog değerleri kullanılarak seçilmiştir.



## 2. Önceki Çalışmalar (Previous Studies)

Bu konuda daha önce yapılmış çalışmalar araştırılmış fakat doğrudan bu konu üzerine yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu konuya yakın olduğu düşünülen bazı çalışmalar ise aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Bishop ve Gibson (1963), konsolidasyon deneyinde kullanılan gözenekli taşın empedans faktörünü dikkate aldığı çalışmasında farklı gözenekli taşlar için kil geçirgenlik oranında %50 empedans faktörü için konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) hesabında %7'lik hata oluştuğunu, empedans faktörünün daha büyük değerlerinde bu hataların azaldığını gözlemlemiştir. Sonuç olarak gözenekli taşın geçirimsizliğinin zemin geçirimsizliğinden daha fazla olması gerektiğini açıklamıştır.

Newland ve Allely (1960), basınç artış oranının ve numune kalınlığının Whangamarino killerin konsolidasyon karakteristikleri üzerindeki etkisini araştırdığı çalışmasında, deneylerde filtre kâğıtlı ve filtre kâğıtsız olarak eski ve yeni (daha önce kullanılmış ve kullanılmamış) gözenekli taş kullanılmasının %50 konsolidasyon ( $t_{50}$ ) için hesaplanan  $c_v$  üzerindeki etkisini incelemiştir. Newland ve Allely (1960) çalışmasında, yeni taş kullanarak yaptığı deneylerde  $t_{50}$  konsolidasyon için gereken sürenin kısaltıldığını (daha küçük  $t_{50}$ ) ve bunun sonucunda da daha yüksek  $c_v$  katsayısı elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca deneylerde filtre kâğıdı kullanılmasının da konsolidasyon süresini kısalttığını ve dolayısıyla  $c_v$  katsayısını artırdığını tespit etmiştir.

Sridharan, Rao ve Murthy (1986), yaptıkları çalışmada tek değerli, çift değerli ve üç değerli katyonlar kullanarak bentonit kilinin Atterberg limitleri ve sıkışabilirlik karakterlerini incelemiştir. İncelemeleri sonucunda katyon miktarının artmasıyla birlikte konsolidasyon oranının ve permeabilite katsayısının da arttığını ve bu değerlerin tek değerli katyonlu bentonitte daha etkili olduğunu gözlemlemiştir.

Yılmaz ve Çelik (2012), yaptıkları çalışmada Erzurum Oltu yöresine ait kile ağırlıkça %10, %20, %30 ve %50 oranlarında öğütülmüş kuvars kumu koyarak kil numunesinin konsolidasyon oturması ve şişme davranışlarını iyileştirmeye çalışmışlardır. Kuvars eklenen killi zemine konsolidasyon ve şişme deneyleri yapmışlar ve eklenen kuvars kumunun artmasıyla zemin numunesinin konsolidasyon katsayısının arttığı ve hacimsel sıkışma katsayısının azaldığı gözlemlemiştir.

Arsoy, Keskin ve Yılmaz (2007), yaptıkları çalışmada seçilen bir kil numunesine düşen seviyeli permeabilite deneyi ile konsolidasyon deneyleri yapmışlardır. Sonuç olarak düşen seviyeli permeabilite deneyi ile bulunan permeabilite katsayısının konsolidasyon deneyi ile bulunan permeabilite katsayısından daha büyük olduğu gözlemlemiştir.

## 3. Malzeme ve Yöntemler (Materials and Methods)

### 3.1. Malzemeler (Materials)

Bu çalışmada, çeşitli kamu kurumlarından ve üretici firmalardan temin edilen 7 farklı gözenekli taş kullanılmıştır (Şekil 3). Taşların bazıları daha önce konsolidasyon deneylerinde kullanılmış bazıları ise daha önce hiç kullanılmamıştır.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan gözenekli taşlar (Porous stones used in experiments)

Gözenekli taşlar 1'den 7'ye kadar numaralandırılmış ve taşların kalınlıkları çapları ve yüzey alanları toplu halde Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** İncelenen gözenekli taşlara ait fiziksel değerler (Physical values of the porous stones examined)

Taşın numarası	Taşın Kalınlığı (mm)	Taşın Çapı (mm)	Taşın Yüzey Alanı (mm <sup>2</sup> )	Daha önce kullanılma durumu
1	5	50	1963	Eski (~ 5 yıl)
2	5	50	1963	Eski (~ 5 yıl)
3	6	50	1963	Yeni
4	6	50	1963	Eski (+10 yıl)
5	6	50	1963	Eski (+10 yıl)
6	6	50	1963	Eski (+10 yıl)
7	6	50	1963	Eski (+10 yıl)

1 ve 2 nolu taşlar Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarından alınmış olup, yaklaşık 5 yıldır kullanılan taşlardır. Taşların kullanım yoğunluğu yılda yaklaşık 10 deney olarak kaydedilmiştir. 3 nolu taş üretici bir firmadan temin edilmiş olup hiç kullanılmamıştır. 4, 5, 6 ve 7 nolu taşlar Karayolları Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiş olup, 10 yıldan fazla bir süredir kullanıldığı öğrenilmiştir.

Empedans faktörünün hesaplanabilmesi için gerekli olan zemin geçirimsizlik katsayıları Geoteknik literatürden elde edilmiştir. Çeşitli kaynaklarda zemin türlerine göre geçirimsizlik katsayıları bulunabilmektedir. Örneğin Terzaghi ve Peck (1948), zeminleri geçirimsizlik derecelerine göre sınıflandırmış ve bu sınıflara denk gelen geçirimsizlik katsayılarını tablo halinde vermiştir. Murthy (2003) zemin türlerine bağlı olarak olası geçirimsizlik katsayılarını tablo halinde vermiştir. Das (2010) suya doygun zeminlerin tipik geçirimsizlik katsayılarını tablo halinde vermiştir. Bahsedilen bu kaynaklardan alınan geçirimsizlik katsayıları sırasıyla Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 2.** Zeminlerin geçirimsizlik değerlerine göre sınıflandırılması (Terzaghi ve Peck, 1948). (Classification of soils according to their permeability values)

Geçirimsizlik Derecesi	Ortalama Geçirimsizlik Katsayısı, k (m/s)
Yüksek	$>10^{-3}$
Orta	$10^{-3}-10^{-5}$
Düşük	$10^{-5}-10^{-7}$
Çok Düşük	$10^{-7}-10^{-9}$
Pratikte Geçirimsiz	$<10^{-9}$

**Tablo 3.** Zemin türlerine bağlı olarak olası geçirimsizlik katsayıları (Murthy, 2003). (Possible coefficient of permeability depending on soil types)

k (m/s)	Zemin türü	Drenaj durumu
(1) - (0,1)	Temiz çakıl	İyi
(0,1)	Temiz kum	İyi
$(10^{-3}) - (10^{-6})$	Temiz kum ve çakıl karışımı	İyi
$(10^{-7})$	Çok ince kum	Zayıf
$(10^{-8})$	Silt	Zayıf
$(10^{-9}) - (10^{-11})$	Kil	Pratikte geçirimsiz

**Tablo 4.** Doygun zeminlerin tipik permeabilite değerleri (Das, 2010). (Typical permeability values of saturated soils)

k (m/s)	Zemin türü
(1) - $(10^{-2})$	Temiz çakıl
$(10^{-2}) - (10^{-4})$	Kaba kum
$(10^{-4}) - (10^{-5})$	İnce kum
$(10^{-5}) - (10^{-7})$	Siltli kil
$(<10^{-8})$	Kil

### 3.2. Uygulanan Yöntem (Applied Methods)

Bu çalışmada öncelikle gözenekli taşların geçirimsizlik katsayıları bulunmuştur. Taşların geçirimsizlik katsayılarının bulunmasında killi zeminlerin permeabilitesini bulmakta kullanılan düşen seviyeli permeabilite deneyindeki

temel ilkelerden yararlanılmıştır. Taşların geçirimsizlik katsayısı ve kalınlığı Eşitlik (1)'de yerine yazılıp empedans faktörü 100'e eşitlenerek bağıntıdan zeminin geçirimsizlik katsayısı çekilmiştir (Eşitlik 2). Bu şekilde hesaplanan zemin geçirimsizlik katsayıları Tablo 2 ve 3'te verilen değerlerle kıyaslanarak gözenekli taşın hangi zeminler için uygun olduğu belirlenmiştir.

$$\frac{k_{\text{taş}} \times h_{\text{dr}}}{100 \times (h_{\text{taş}})} \geq k_{\text{zemin}} \quad (2)$$

Hesaplamalarda zemin numunesinin kalınlığı 20 mm olarak alınmıştır. Konsolidasyon deneyinde zemin numunesinin hem altında hem de üstünde gözenekli taş bulunduğundan drenaj yolunun uzunluğu  $h_{\text{dr}}=10$  mm (0,01 m) olarak hesaba katılmıştır.

#### 4. Deneysel Bulgular (Experimental Findings)

Bu çalışmada kullanılan gözenekli taşların ve bu taşların kullanılabileceği zeminlerin geçirimsizlik katsayıları Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 5.** Gözenekli taşların ve zeminlerin geçirimsizlik katsayıları (Permeability coefficients of porous stones and soils)

Taşın numarası	Taşın geçirimsizlik katsayısı ( $k_{\text{taş}}$ ) (m/s)	Zeminin drenaj yolunun uzunluğu, ( $h_{\text{dr}}$ ) (m)	Taşın kalınlığı ( $h_{\text{taş}}$ ) (m)	Uygun olan Zeminin geçirimsizlik katsayısı (m/s) $k_{\text{zemin}} \leq$
1	$2,750 \times 10^{-6}$	0,01	0,005	$0,55 \times 10^{-7}$
2	$0,732 \times 10^{-5}$	0,01	0,005	$1,46 \times 10^{-7}$
3	$1,570 \times 10^{-5}$	0,01	0,006	$2,62 \times 10^{-7}$
4	$0,540 \times 10^{-5}$	0,01	0,006	$0,90 \times 10^{-7}$
5	$0,980 \times 10^{-5}$	0,01	0,006	$1,63 \times 10^{-7}$
6	$1,605 \times 10^{-5}$	0,01	0,006	$2,67 \times 10^{-7}$
7	$1,520 \times 10^{-5}$	0,01	0,006	$2,53 \times 10^{-7}$

Elde edilen bu sonuçlara göre bu çalışmada incelenen gözenekli taşların hemen hepsinin geçirimsizlik katsayısı  $k = 10^{-7}$  m/s'den küçük olan zeminler için uygun olduğu görülmüştür.  $k = 10^{-7}$  m/s Tablo 2, 3 ve 4'te verilen sınıflamaya göre düşük geçirimsizliğe sahip silt ve killere karşılık gelmektedir. Bu durumda incelenen gözenekli taşların, düşük geçirimsizliğe sahip silt ve kil türü zeminler için uygun olduğu görülmüştür.

Ayrıca, Tablo 3'te verilen zemin türlerine karşılık gelen geçirimsizlik katsayıları kullanılarak Eşitlik (1) ile gözenekli taşların empedans faktörleri hesaplanmış ve sonuçları Tablo 6'te verilmiştir.

**Tablo 6.** Gözenekli taşların Murty (2003)'te verilen geçirimsizlik katsayıları dikkate alınarak hesaplanan empedans faktörleri (Impedance factors of porous stones calculated by considering the permeability coefficients given in Murty, 2003)

Taş No	Empedans Faktörü, E		
	İnce kum, $k=10^{-7}$ (m/s)	Silt, $k=10^{-8}$ (m/s)	Kil, $k=10^{-9}$ (m/s)
1	55	550	5500
2	146	1464	14640
3	262	2617	26167
4	90	900	9000
5	163	1633	16333
6	268	2675	26750
7	253	2533	25333

Tablo 6'da görülen empedans faktörleri incelendiğinde, ince kum için 1 ve 4 nolu taşların empedans faktörünün 100'den küçük olduğu ve bu taşların ince kum türü zeminler için uygun olmadığı görülmüştür. Ancak düşük geçirimsizliğe sahip kil ve silt türü zeminler için hesaplanan empedans faktörlerine bakıldığında gözenekli taşların tamamının empedans faktörünün 100'den büyük olduğu (Tablo 6) ve bu gözenekli taşların kil ve silt türü zeminlerin konsolidasyon deneyinde kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Benzer şekilde Das (2010)'da verilen geçirimsizlik katsayıları dikkate alınarak gözenekli taşların empedans faktörleri hesaplanmış ve sonuçları Tablo 7'de sunulmuştur.

**Tablo 7.** Gözenekli taşların Das (2010)'da verilen geçirimsizlik katsayıları dikkate alınarak hesaplanan empedans faktörleri (Impedance factors of porous stones calculated by considering the permeability coefficients given in Das, 2010)

Taş No	Empedans Faktörü, E		
	İnce kum için, $k=10^{-4}$ (m/s)	Siltli kil için, $k=10^{-5}$ (m/s)	Kil için, $k=10^{-8}$ (m/s)
1	0,055	0,55	550
2	0,146	1,46	1464
3	0,262	2,62	2617
4	0,090	0,90	900
5	0,163	1,63	1633
6	0,268	2,68	2675
7	0,253	2,53	2533

Tablo 7'den görülebileceği gibi Das (2010)'da verilen geçirimsizlik katsayıları dikkate alındığında sadece kil türü zeminler için hesaplanan empedans faktörlerinin 100'den büyük olduğu, dolayısıyla bu çalışmada incelenen gözenekli taşların sadece kil türü zeminler için uygun olduğu değerlendirilmiştir.

## 5. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmada, konsolidasyon deneyinde kullanılan gözenekli taşların geçirimsizlik katsayıları ölçülmüş ve ASTM D2435 (2011)'de tanımlanan empedans faktörü yardımıyla bu taşların hangi tür zeminler için uygun olabileceği değerlendirilmiştir. ASTM D2435 (2011)'de tanımlanan empedans faktörü kullanılarak gözenekli taşların geçirimsizliği iki farklı yaklaşımla ele alınmıştır.

Birinci yaklaşımda, gözenekli taşların empedans faktörünün 100'den büyük olmasını sağlayacak zeminlerin geçirimsizlik katsayıları hesaplanmış ve bu taşların hangi zeminler için uygun olabileceği belirlenmiştir. Buna göre, bu çalışma kapsamında geçirimsizliği ölçülen taşların, geçirimsizlik katsayısı  $k = 10^{-7}$  m/s'den küçük olan zeminler için uygun olduğu görülmüştür.

İkinci yaklaşımda ise literatürde zeminler için verilen tipik geçirimsizlik katsayıları kullanılarak gözenekli taşların empedans faktörleri hesaplanmış ve hesaplanan değerlerin 100'den büyük olup olmamasına bakılarak hangi tür zeminler için uygun olduğu değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeye göre incelenen gözenekli taşların killi ve siltli-killi zeminlerin için uygun olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak ASTM D2435 (2011)'de tanımlanan empedans faktörünün konsolidasyon deneyinde kullanılan gözenekli taşların geçirimsizliğinin değerlendirilmesi için rahatlıkla kullanılabilmesi görülmüştür.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar, laboratuvar deneylerindeki katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümü öğrencisi Anıl CAN ÖZTEMUR'a teşekkür ederler.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Arsoy, S., Keskin, E. ve Yılmaz, C. (2007). Permeabilite ve Konsolidasyon Deneyleri ile Elde Edilen Permeabilite Katsayılarının Karşılaştırılması. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 2. Geoteknik Sempozyumunda sunuldu, Adana.
- ASTM, 2020. ASTM resmi web sitesi. [https://compass.astm.org/EDIT/html\\_historical.cgi?D2435+96](https://compass.astm.org/EDIT/html_historical.cgi?D2435+96), indirilme tarihi 06.02.2020).
- ASTM D2435/2435M-11, 2011. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. American Society for Testing and Materials.
- Bishop, A. W., ve Gibson, R. E., 1964. The Influence of the Provisions for Boundary Drainage on Strength and Consolidation Characteristics of Soils Measured in the Triaxial Apparatus. Laboratory Shear Testing of Soils. ASTM, 361, 435-451.
- BS 1377-5, 1990. Methods of test for Soils for civil Engineering purposes. Part 5: Compressibility, permeability and durability tests. British Standard, Londra, İNGİLTERE.
- Budhu, M., 2011. Soil Mechanics and Foundations (3rd ed. b.). New York: John Wiley & Sons Inc, 208.
- Das, B. M., 2010. Principles of Geotechnical Engineering (7th ed. b.). Stamford-USA: Cengage Learning, 164.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., ve Sheahan, T. C., 2015. Geoteknik Mühendisliğine Giriş (Çev. O. Akbaş). Ankara: Nobel Akademik. (Eserin orijinali 2011'de yayımlandı), 347, 350.

- Knappett, J. A. ve Craig, R. F., 2012. Craig's Soil Mechanics (8th ed. b.). USA: Spon Press, 101.
- Murthy, V. N., 2003. Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering. New York: Marcel Dekker Inc, 102.
- Newland, P. L. ve Alley, P. H., 1960. A study of the consolidation characteristics. Geotechnique, 10, 62-74.
- Sridharan, A., Rao, S. M. ve Murthy, N. S., 1986 Compressibility Behaviour of Homozonized Bentonites. Geotechnique, 36, 551-564.
- TS 1900-2, 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara/TÜRKİYE.
- Yılmaz, I., Yıldırım, M., ve Keskin, İ., 2016. Zemin Mekanığı Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Örnekler (3. baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık, 93-99.
- Yılmaz, M.K. ve Çelik, S., 2012. Kil Zeminin Şişme Basıncı ve Konsolidasyon Özelliklerine Öğütülmüş Kumun Etkisinin Araştırılması. KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15, 32-36.



## ISM 2.45 GHz MİKROŞERİT İMPLANT ANTEN TASARIMI VE DOKU İÇİ ÖLÇÜMLERİ

Fatih ALPER\*, Özlem COŞKUN

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>İmplant Anten, Doku İçü Uygulamalar, Biyoteleometri, Mikroşerit Anten.</i>	Bu çalışmada doku içü uygulamalar için kullanılabilir olacak özgün bir mikroşerit implant anten tasarımı önerilmiştir. Anten boyutu 30 mm*28 mm*1.59 mm olarak tasarlanmıştır. Tasarımında dielektrik sabiti 4.3, kayıp tanjantı 0.025 ve yüksekliği 1.52 mm olan FR4 taban malzemesi kullanılmıştır. İmplant antenin analizi CST Microwave Studio programında gerçekleştirilmiştir. İstenilen değerler elde edildikten sonra ise doku modeli oluşturularak deri doku içerisine implant anten yerleştirilmiştir. Tasarlanan mikroşerit implant antenin ISM bandında 2.45 GHz'de geri dönüş kaybı ve SAR değeri ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda doku içü ve doku dışı sırasıyla geri dönüş kaybı -18 dB ve -33 dB, SAR değeri ise 153 W/kg olarak gözlemlenmiştir. Daha sonra antenin baskı-devre teknolojisi ile gerçekleştirilmesi yapıp, deri dokusunun özelliklerini gösteren bir fantom sıvı oluşturulmuş ve anten bu sıvı içine yerleştirilmiştir. Son olarak da tasarımı yapılan antenin simülasyon ve deney sonuçları değerlendirilerek literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılması yapılmıştır. Deri dokusu içerisindeki ölçüm sonuçlarının da benzetim sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

## ISM 2.45 GHz MICROSTRIP IMPLANT ANTENNA DESIGN AND IN-TISSUE MEASUREMENTS

Keywords	Abstract
<i>Implant Antenna, In-Tissue Application, Biotelemetry, Microstrip Antennas.</i>	In this study, a micro-strip implant antenna that can be used in-tissue applications was proposed. Antenna size was designed as 30mm * 28mm * 1.59mm. In the design, a FR4 substrate material was used whose permittivity is 4.3, loss tangent is 0.025 and height is 1.52 mm. The analysis of the implant antenna was simulated in the CST Microwave Studio program. After obtaining the desired performance, a tissue model was created and an implant antenna was placed in the skin tissue. Return loss and SAR value of the designed antenna were measured in the 2.45 GHz ISM band. As a result, return losses were observed as -18 dB and -33 dB and SAR was 153 W / kg inside and outside the tissue respectively. Then, the antenna was manufactured with PCB and a phantom liquid was created that provides the electromagnetic properties of the skin tissue and the antenna was placed in this liquid. Finally, the simulation and experiment results of the designed antenna were evaluated and compared with literature studies. It has been observed that the measurement results in the skin tissue are well aligned with the simulation results.

### Alıntı / Cite

Alper, F., Coşkun, Ö., (2020). ISM 2.45 GHz Mikroşerit İmplant Anten Tasarımı ve Doku İçü Ölçümleri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 541-551.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

F. Alper, 0000-0003-3195-9727  
Ö. Coşkun, 0000-0001-8800-4433

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	12.02.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	16.03.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	04.04.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: fatihalper64@gmail.com, +90-545-684-0323

## 1. Giriş (Introduction)

Telemetri bir sistemin uzaktan ulaşılamayan bir bölgesini kontrol edilmesi ve izlenmesidir. İnsanlar ve hayvanlar için kullanılan telemetriye ise biyotelemetri adı verilmektedir. Biyotelemetri sistemlerinin temelleri, Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi NASA tarafından 1958 yılında ortaya çıkarılmıştır. Uzaya gönderilen astronotların fizyolojik parametrelerinin, yeryüzünde bulunan sağlık çalışanlarına iletilmesi için yapılan araştırmalar biyotelemetri sistemlerinin ana gövdesini oluşturmuştur (Singh, 2005). Aynı yıl içerisinde Ake Senning'in ilk kez bir kalp pilini insan vücudu içerisine yerleştirmesi de implant edilebilir biyomedikal cihazların sivil amaçlı kullanımı olarak günlük yaşamımızda yer almıştır (Hall ve Hao, 2012).

Biyotelemetri sistemlerinin ana görevi ise, insan vücudundaki hayati parametrelerin uzaktan takibini yapmak ve doktorlara hastalıkların teşhis ve tedavisinde yardımcı olmaktır. Günümüz biyotelemetri uygulamalarında EKG, EMG, EEG, kan basıncı, kan akışı ve vücut sıcaklığı gibi birçok değerın uzaktan ölçülmesi mümkündür. Uygulama alanlarındaki bu çeşitlik biyotelemetri sistemlerinde kullanılacak olan biyomedikal cihazların farklılaşmasını sağlamak ve cihazların tasarımlarını gün geçtikçe değiştirmektedir. Özellikle hastalıkların önceden teşhisinin oldukça önem kazandığı son yıllarda biyotelemetri uygulamalarının gereksinimlerini karşılayacak yenilikçi elemanların (anten, mikroışlemci/ mikrodenetleyici, sensör gibi) geliştirilmesine/ üretilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemlerin önemli bileşenlerinden biri olan anten elemanı, verilerin iletilmesini sağlarken, sistemin güçlendirilmesinde de oldukça kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda biyo-uyumlu ve uygulama gereksinimlerini karşılayacak minyatür yapıları anten tasarımlarının geliştirilmesi tıbbi sistemin başarımı açısından üstesinden gelinmesi gereken önemli bir parametredir (Topsakal, 2009, Armağan ve Kahriman, 2016).

Tıbbi uygulamalarda kullanılan anten tasarımları genel olarak, yutulabilir, giyilebilir ve implant antenler olmak üzere üç grupta incelenmiştir. Yutulabilir antenler, vücut içindeki değişkenlik gösteren bazı parametrelerin (örneğin, ısı) aktarılmasında ve kolon kanserinin teşhisinde kullanılmaktadır (Yang vd., 2008). Giyilebilir antenler ise vücut yüzeyine yerleştirilerek kalp ritmi, kandaki oksijen miktarı ve kandaki şeker seviyesi gibi değerlerin ölçümünde kullanılabilirler (Lee, 2015). İmplant antenler ise vücut içerisinde belirli bir konuma sabit olarak yerleştirilerek mikrodalga görüntüleme, kalp ritim bozuklukları, kanser teşhis ve tedavisinde kullanılmaktadır (Sondas vd., 2014).

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Gözel vd. (2019), vücuda yerleştirilen biyomedikal antenler üzerine çalışılmıştır. Bir anten tasarımı yapılarak, bu anten simüle edilmiştir. Çalışmada kullanılmak üzere rezonans frekansı 868 MHz UHF bandında, H şeklinde bir mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan antende alt yapı malzeme olarak FR4 kullanılmıştır. Simülasyon için oluşturulan doku üç farklı katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar kas, yağ ve deriden meydana gelmektedir. Anten bu doku örneğinde deri ile yağ katmanı sınırındadır. Simülasyon sonucuna göre SAR değeri CST simülasyon programında 396,8 W/kg olarak hesaplanmıştır. Çalışmada diğer çalışmalarla karşılaştırma yapılarak ortalama bir değer bulunduğu görülmüştür. Ayrıca doku içinde tasarlanan antenlerin çalışma frekansının ayarlanabilmesi, antenin doku içindeki yerine, dokunun iletkenlik ve dielektriği gibi birçok parametre bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

Yeap vd. (2019), implant edilebilir çift bant çalışan bir anten üzerine çalışma yapmıştır. Tasarlanan antenin rezonans frekansları 402 MHz ve 2.45 GHz'dir. Antende malzeme olarak RO3210 kullanılmıştır. Doku içi uygulamalarda kullanılan antenlerin boyutları oldukça küçük tasarlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan antenin boyutları 22 mm\*16 mm\*1.27 mm'dir. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre SAR değeri 402 MHz ve 2.45 GHz frekanslarında sırası ile 0.352 ve 0.054 uW/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değerler IEEE C95.1-1999 tarafından belirlenen sınırların altında olduğu görülmüştür. Daha sonra anten ilk önce insan derisine koyularak, ardından parçalanmış domuz etine koyularak ölçümler yapılmıştır. Ölçümler sonucu antenin iyi radyasyon özelliklerine sahip olduğu ve SAR değerinin düşük olmasıyla kullanılabilir bir anten olduğu gözlemlenmiştir.

Kumar ve Raj (2017), bu çalışmada biyomedikal uygulamalar için yeni bir implant anten tasarımı yapılmıştır. Böyle bir çalışma ile kablosuz olarak insan vücudundaki bazı olayları incelemek hedeflenmiştir. Tasarlanan anten dielektrik malzemesi teflon olan bir yama antendir. Boyutları 16 mm\* 16 mm\* 1 mm'dir. Önerilen antenin frekansı 2.4-2.48 GHz olarak tasarlanmıştır. İnsan dokusunu tek katmanlı olarak düşünülmüştür. Simülasyon olarak kas dokusunun özellikleri kullanılmıştır. Simülasyonlar CST üzerinden yapılmıştır. Daha sonra dokunun fantom modeli oluşturularak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda antenin geri dönüş kaybı -37 dB olarak gözlemlenmiştir. ISM bandında tasarlanan bu antenin boyutunun küçük olması ve yapılan ölçümler sonucunda bu tür uygulamalar için kullanılması uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Yamaç, (2015), biyomedikal telemetri için implant edilebilir mikroşerit anten tasarımı sunmuştur. Tanıtılan anten 402-405 MHz MICS bandını ve 2.45 GHz ISM bandını kapsamaktadır. Anten implant edilebilir olması için antenin küçük boyutlarda olması gerekmektedir. Tanıtılan antenin boyutları 10.5 mm \* 11.5 mm \* 1.27 mm'dir. Anten Rogers 3010 taban malzemesi ile tasarlanmıştır. İmplant antenin analizi CST Microwave Studio programı kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca tek katmanlı deri dokusu fantom modeli oluşturularak da ölçümler yapılmıştır. Bu çalışmada ek olarak esnekliği göstermek adına üç farklı boyutta anten tasarımı da sunulmuştur. Yapılan ölçümler sonucunda MICS bandında %42,1 ve ISM bandında %5,8 bant genişliği sunmaktadır. Anten kazançları sırasıyla 39 dB ve 22.9 dB'dir. SAR değeri olarak da sırasıyla 369 W/kg ve 396.4 W/kg'dır. Bu ölçümler ışığında sonuçların diğer çalışmalara göre tatmin edici olduğu gözlemlenmiştir.

See vd. (2015), 434 MHz'de nöro motor protez için iki implant anten sunulmuştur. Bu anten dipol bir implant antendir. Antenin simülasyonunda üç boyutlu olan deri, yağ ve kas dokudan oluşan doku modeli kullanılmıştır. Anten kalınlığı 0.8 mm olup dokudan 20 mm uzağa konumlandırılmıştır. Tasarımı sunulan antenin simülasyonları HyperLynx 3D electromagnetic software programı kullanılmıştır. Antenin yönlülüğü 3.8 dB ve bant genişliği %4,6 olarak gözlemlenmiştir. Yapılan ölçümlerde 8 cm de -14 dB kayıp olduğu gözlemlenmiştir. İleriki çalışmalar için bant genişliği artırılarak daha iyi sinyal aktarımı önerilmiştir.

Huang ve Kishk (2011), insan vücuduna yerleştirilen kalp pili için bir implant anten tasarımı yapılmıştır. Bu anten MICS bandında 403 MHz de çalışmaktadır. Anten, spiral şeklinde tasarlanmış mikroşerit bir antendir. Taban malzemesi olarak Rogers kullanılmıştır. Doku olarak kas dokuya yerleştirilmiştir. Ölçümler ilk olarak HFSS simülasyon programında gerçekleştirilmiş daha sonra kas dokusunun fantom eşdeğer sıvısı oluşturularak ölçümler tamamlanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre antenin doku içindeki  $S_{11}$ 'i 403 MHz merkez frekansında -18 dB iken anten boşlukta  $S_{11}$ 'i 489 MHz merkez frekansında -3 dB olmaktadır. Ölçülen SAR değeri ise 2.749 W/kg olarak gözlemlenmiştir. Yapılan gözlemler sonucu simülasyon ile ölçümlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Kiourti ve Nikita (2012), bu çalışmada implant antenlerin dokudaki tasarım ve elektromanyetik etkileri incelenmiştir. Bunun için dört farklı frekansta (402 MHz, 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz) PIFA anten tasarımları yapılmıştır. Bu çalışmada anten kafadaki deri doku özelliklerine göre ölçümler yapılmıştır. Ölçümler deri dokusunun eşdeğer fantom modeli oluşturularak yapılmıştır. Ölçümler sonucunda 402 MHz, 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz frekanslarında sırası ile SAR değeri 1 g dokuda 324.74 W/kg, 309.74 W/kg, 296.94 W/kg, 294.86 W/kg olarak ölçülmüştür. Antenlerin kazançları sırası ile 36.9 dB, 35.99 dB, 35.14 dB, 32.94 dB olarak gözlemlenmiştir.

Duan vd. (2012), diferansiyel olarak beslenen dual band bir implant anten tasarımı sunmuştur. Bu besleme şekli olarak literatürdeki ilk implant anten tasarımıdır. Bu anten 433.9 MHz ve 542.4 MHz olmak üzere iki rezonans frekansta çalışmaktadır. Anten üç katmanlı doku modelinin her katmanına koyularak ölçüm yapılmıştır. Yapılan çalışma ilk önce HFSS programında simüle edilmiş, daha sonra fantom sıvıda ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda antenin tek katmanlı doku ile çok katmanlı doku arasında çok bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca değişik dokularda yapılan ölçümlerden yola çıkarak, deri ve kas dokuda yapılan ölçümler birbirine yakın yağ dokuda ise biraz düşüktür. Bunun nedeni yağ dokunun iletkenlik ve geçirgenliğinin yüksek, dielektriğinin ise düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan ölçümlerde SAR değeri 10 g dokuda 423 MHz ve 532 MHz de sırası ile y-z düzleminde 0.930 mW/kg ve 0.936 mW/kg, x-z düzleminde 0.895 mW/kg ve 0.933 mW/kg olarak gözlemlenmiştir.

### 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

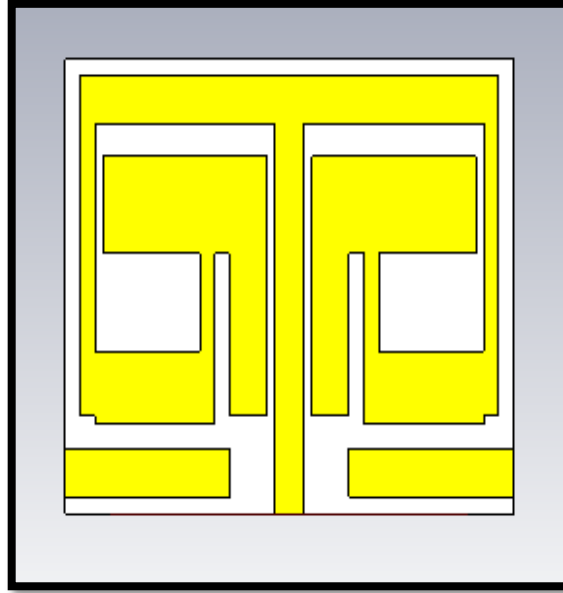
#### 3.1. İmplant Antenin Tasarımı ve Gerçeklenmesi (Design and Verification of Implant Antenna)

İmplant anten tasarımında ilk olarak bilgisayar ortamında CST simülasyon programında doku modeli oluşturularak simülasyon yapılmıştır. İkinci olarak da dokuların eşdeğer sıvısı oluşturularak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bunun amacı direk insan vücudunda ölçüm yapılamayacak olmasıdır. Literatürde fantom model kullanarak ölçüm yapan birçok çalışma vardır (Merli vd., 2011; Polat, 2011; Kumar ve Raj, 2017). Aynı zamanda bu ölçümler hayvanlar üzerinde de yapılabilmektedir (Merli vd., 2011; Yeap vd., 2019).

İmplant anten tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden bir tanesi antenin doku içi uygulamalarında uygulanacağı için küçük boyutlarda gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Küçük boyutlarda tasarlanan antenin istenilen frekansta ve istenilen  $S_{11}$  performansını elde etmek oldukça güçtür. Bu gerekçeler göz önünde bulundurulduğunda 30 mm \* 28 mm büyüklüğe sahip anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dielektrik malzemesi FR4 olan yama anten tasarımı kullanılmıştır. Bu çalışma 2.45 GHz ISM bandında yapılmaktadır.

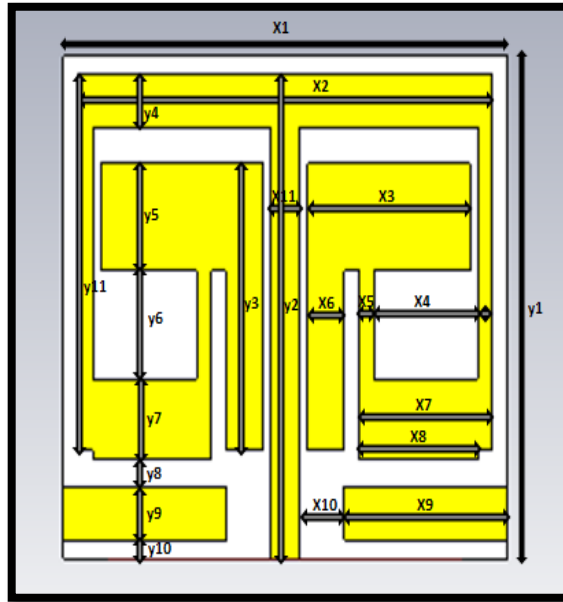


Küçük boyuttaki bir antenin rezonans frekansını ayarlamak oldukça zordur. Merkez frekansını ayarlamak için birçok yöntem kullanılabilir. Bu tasarımda Şekil 1'de gösterildiği gibi antenin ön yüzüne besleme hattının başlangıcının sağ ve sol tarafına toprak ile bağlantılı iletken koyularak merkez frekansı ayarı yapılmıştır.



Şekil 1. Mikroşerit antenin simülasyon görüntüsü (Simulation view of microstrip antenna)

Tasarımı yapılan mikroşerit antenin ölçü parametreleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



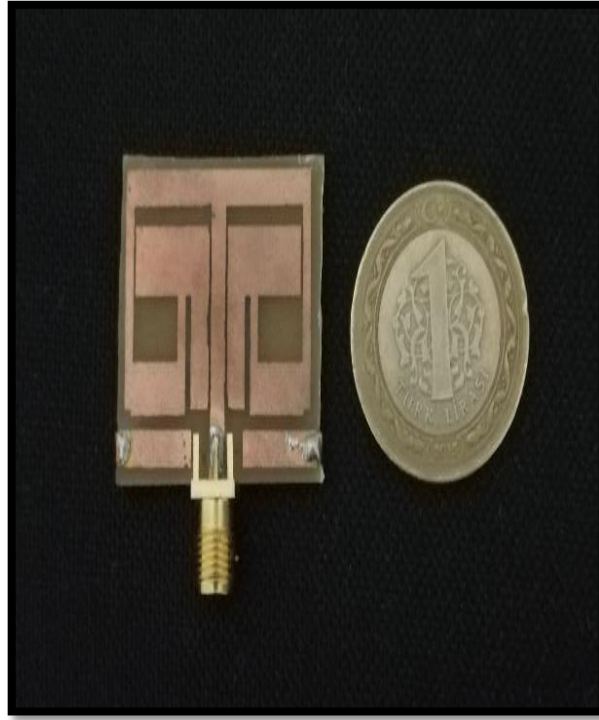
Şekil 2. Mikroşerit antenin uzunluk parametreleri (Length parameters of microstrip antenna)

Aşağıdaki Tablo 1'de antenin uzunluk parametreleri verilmiştir. Yama antenin simülasyonunda dielektrik malzemenin kalınlığı 1.52 mm ve iletkenin kalınlığı ise 0.035 mm olarak alınmıştır.

Tablo 1. Tasarlanan mikroşerit antenin uzunluk parametreleri (Length parameters of designed microstrip antenna)

Uzunluk Parametreleri	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
Uzunluk Değerleri (mm)	30	28	11	7	1	2.5	9	8	11	2.5	2
Uzunluk Parametreleri	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Uzunluk Değerleri (mm)	28	27	16	3	6	6	4.5	1.5	3	1	21

Mikroşerit antenin simülasyonu yapıldıktan sonra antenin baskı-devre teknolojisi ile gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Gerçekleştirilmesi yapılan mikroşerit antenin görüntüsü Şekil 3’de verilmiştir.

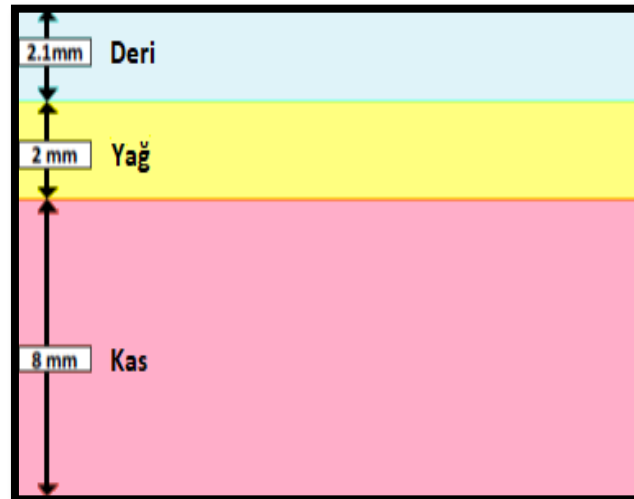


Şekil 3. Tasarımı yapılan antenin gerçekleştirilmiş görüntüsü (Verification view of designed antenna)

### 3.2. Doku Modelinin Oluşturulması (Composing of Tissue Model)

Bu çalışmada üç katmanlı doku modeli kullanılmıştır. Önceki bölümde bahsedildiği gibi ölçümlerin yapılmasında direkt olarak insan vücudu kullanılması mümkün olmadığı için, simülasyon aşamasında en yakın sonuçları elde edebilmek amacıyla bu şekilde tasarım yapılmıştır. Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde çalışmaların büyük çoğunluğunda üç katmanlı tasarım yapıldığı gözlemlenmiştir (Kim ve Rahmat-Samii, 2004; Karaçolak vd., 2008; Almari vd., 2013; Doddipalli vd., 2017; Gözel vd., 2019). Bu tasarım CST Microwave Studio programı kullanılarak tasarlanmış ve ölçümler yapılmıştır.

Üç boyutlu doku modeli Şekil 4’de gösterilmiştir. Tasarımı yapılan implant anten deri dokunun içine yerleştirilmiştir.



Şekil 4. Üç katmanlı doku modeli (Three layered tissue model)

### 3.3. Doku Fantom Sıvısının Oluşturulması (Composing of Tissue Phantom Liquid)

Bu çalışmada 2.45 GHz ISM bandına göre fantom sıvı oluşturulmuştur. Kullanılan malzemeler ve oranları aşağıdaki Tablo 2’de belirtilmiştir.

**Tablo 2.** Deri dokunun MICS ve ISM bandında Fantom İçeriği (Phantom content in MICS and ISM band of skin tissue)

KULLANILAN MALZEMELER	MICS BANDI	ISM BANDI
	(402 - 405 MHz)	(2.4 - 2.48 GHz)
DEİYONİZE SU	%41,49	%47
ŞEKER (SÜKROZ)	%56,18	%53
TUZ (NaCl)	%2,33	-
AGARÖZ	100 ml’lik karışıma 1 g eklenir	

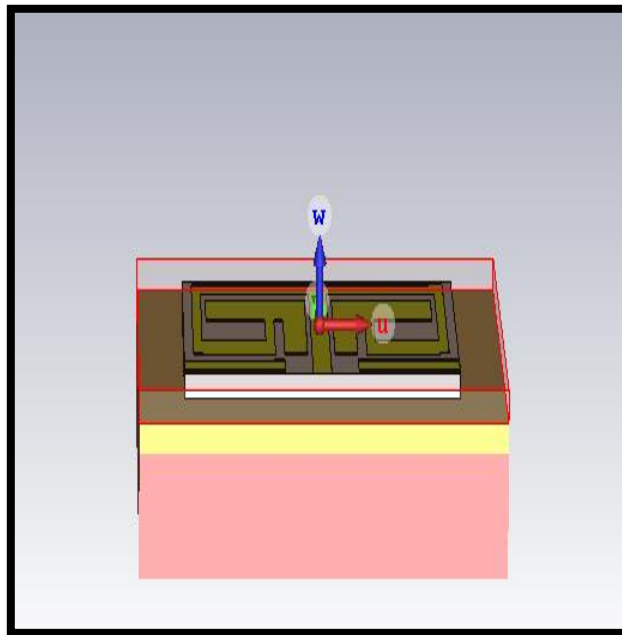
ISM bandında yapılan çalışmalar için literatürde farklı içeriklerde bulunmaktadır. Bunun nedeni ISM bandı için kullanılan malzemelerin oldukça zor bulunması ve pahalı olmasıdır. Örneğin; %58,2 deiyonize su, %5,1 DGBE ve %36,7 Triton ile yapılan bir çözelti yine 100 ml’lik karışıma 1 g agaroz ekleyerek kullanılarak fantom sıvı içeriği bazı çalışmalarda verilmiştir (Fukunaga vd., 2004; Yamaç, 2015).

Doku içinde antenin ölçümleri simülasyonda üç katmalı yapılırken, fantom sıvıda sadece deri doku oluşturularak ölçüm yapılmıştır. Çünkü literatürdeki bazı çalışmalarda ölçümler için sadece bir dokunun olmasının yeterli olduğunu kanıtlamıştır (Duan vd., 2012; Yamaç, 2015). Fantom sıvıda üç katman modelinin kullanılması zor ve pahalı olduğu için bu çalışmada tek katman modeli uygulanmıştır.

### 3.4. Antenin Yerleştirildiği Ortam (Antenna Placed in Medium)

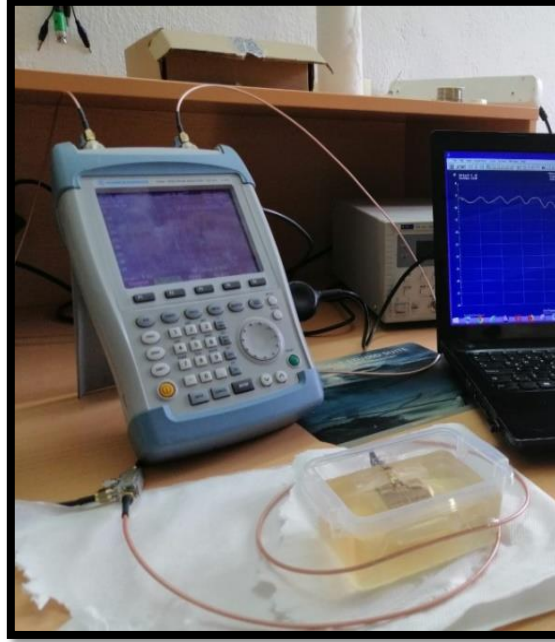
Yapılan çalışmada üç boyutlu doku modelinin kullanılmasının nedenlerinden bir tanesi kas, yağ ve deri dokunun vücudun hemen hemen her yerinde bulunmasıdır.

Antenin deri dokuya yerleştirilmesi anten veriminin iyi olması ve kolay cerrahi operasyon açısından düşünülmüştür. Anten, dokuda ne kadar derine koyulursa o kadar verim azalacaktır. Çünkü doku ortamı çok kayıplı bir ortamdır. Ayrıca dokular tarafından soğurma oranı daha da artacaktır. Şekil 5’de implant antenin simülasyonda doku içerisindeki konumu gösterilmiştir.



**Şekil 5.** Deri dokusuna yerleştirilen implant antenin konumu (Position of the implant antenna placed in the skin tissue)

Simülasyonu yapılan ölçümlerin gerçekleşmesi için Tablo 2'de gösterildiği üzere fantom sıvı hazırlanmıştır. Hazırlanan bu sıvı Şekil 6'da gösterildiği gibi bir kap içerisine koyularak anten içine konumlandırılmıştır. Ölçümler Rohde & Schwarz (FSH6) marka spektrum analizör kullanılarak yapılmıştır.

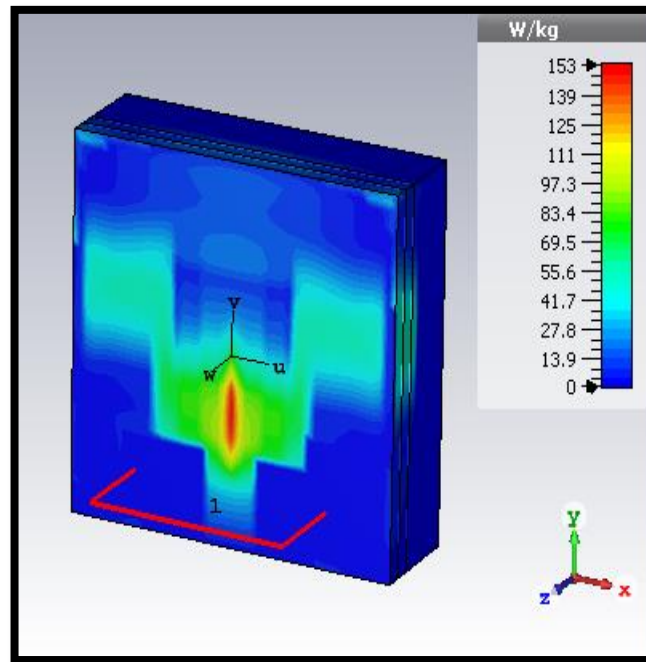


Şekil 6. Fantom sıvı ve ölçüm düzeneği (Phantom liquid and measuring device)

#### 4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Yapılan çalışmada simülasyonda implant mikroserit antenin  $S_{11}$  ve SAR (özgül Soğurma Oranı) değerleri incelenmiştir. Ölçümlerin gerçekleşmesinde ise sadece implant antenin  $S_{11}$  sonuçları değerlendirilmiştir.

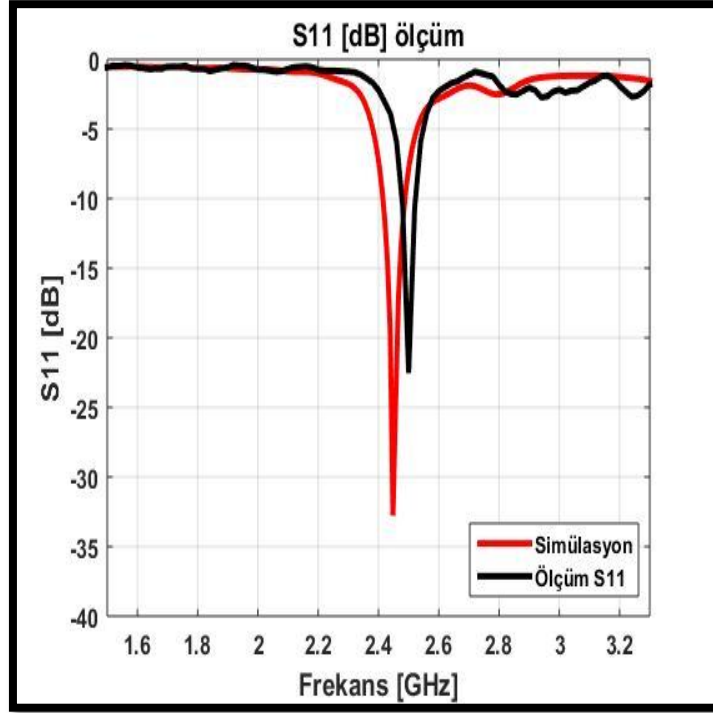
SAR için sınır değer olarak IEEE C95.1standartı 1 g doku için 1.6 W/Kg olarak belirlemiştir (Gözel, 2019). Mevcut çalışmadaki SAR değeri CST simülasyon programı ile 1 W giriş için ölçüm yapılmış dokunun görüntüsü ve SAR değeri Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Dokudaki SAR dağılımı ve sonuç skalası (SAR distribution in the tissue and result scale)

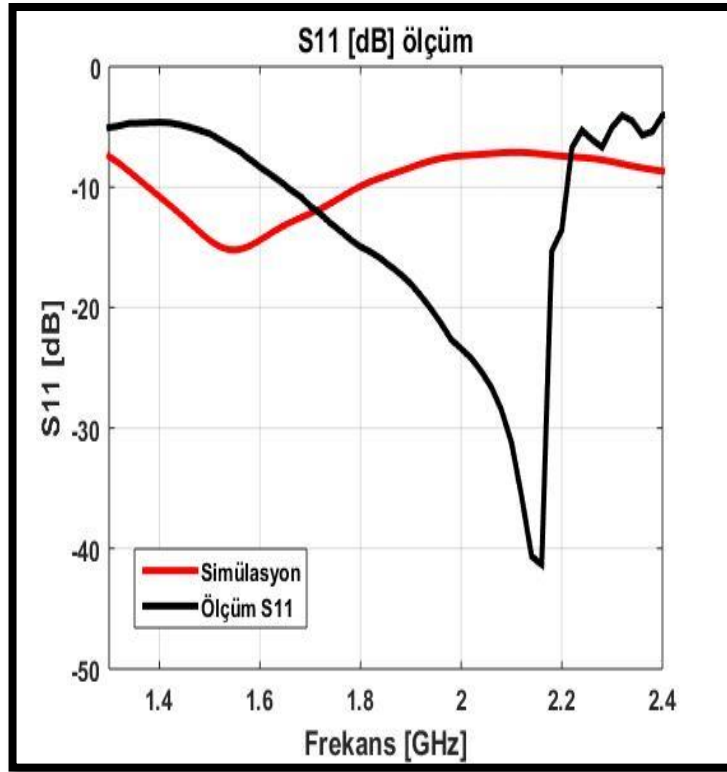
Şekil 6'da da görüldüğü gibi tasarlanan antenin maksimum SAR değeri 153 W/kg olarak belirlenmiştir. Tablo 3'de yapılan karşılaştırmaya göre gayet iyi bir değer olduğu görülmektedir. Tasarlanan mikroşeritimplant antenin  $S_{11}$  sonuçları ise antenin doku içinde ve dışında olmak üzere iki ayrı şekilde ölçülmüştür.

Doku dışındaki antenin Şekil 7'de  $S_{11}$  grafiği verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi simülasyon sonucu merkez frekansı 2.45 GHz, geri dönüş kaybı -33 dB olarak gözlemlenmiştir. Antenin gerçek ölçüm sonucu ise 2.49 GHz de -23 dB olarak ölçülmüştür.



Şekil 7. Doku dışı  $S_{11}$  ölçüm sonuçları (Non-tissue  $S_{11}$  measurement results)

Şekil 8'de doku içi ölçümler için  $S_{11}$  grafiği verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi simülasyon sonucu merkez frekansı 1.56 GHz, geri dönüş kaybı -18 dB olarak gözlemlenmiştir. Antenin fantom sıvıya konulduktan sonraki ölçüm sonucu ise 2.16 GHz de -41 dB olarak ölçülmüştür.



Şekil 8. Doku içi  $S_{11}$  ölçüm sonuçları (In-tissue  $S_{11}$  measurement results)

Yukarıdaki Şekil 7 ve Şekil 8'deki grafikler CST Microwave Studio ve spektrum analizörden alınan verilerin MATLAB programına girilerek grafikler oluşturulmuştur.

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, doku içi uygulamalarda kullanılabilecek ISM bandında 2.45 GHz merkez frekansında çalışan bir mikroşerit implant anten tasarımı yapılmıştır. Tasarımlar 3D elektromanyetik simülasyon yazılımı olan uzayında sonlu integral tekniğini temel alan CST Microwave Studio programı içerisinde modellenmiş ve tasarımların analizleri yapılmıştır.

Antende dielektrik malzeme olarak FR4 kullanılmıştır. Tasarlanan antenin boyutu 30 mm \* 28 mm \* 1.59 mm'dir. Simülasyon sonucunda antenin merkez frekansı 2.45 GHz ve geri dönüş kaybı -33 dB olarak görülmüştür. Gerçek ölçüm sonucunda ise merkez frekansının 2.49 GHz ve geri dönüş kaybı -27 dB olarak ölçülmüştür. Doku içi ölçümlerde ise simülasyon sonucu geri dönüş kaybı -18 dB, fantom sıvıya konulan antenin ise geri dönüş kaybı -41 dB olarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde doku dışı ölçümlerde fark yok denilecek kadar az iken doku içi ölçümlerde biraz fark oluşmuştur. Oluşan bu fark oluşturulan fantom sıvı hazırlanırken sıcaklık değerinin ve dielektrik sabitinin tam ayarlanamamasından kaynaklanması muhtemeldir. Ayrıca ölçüm simülasyon sonucu dokudaki SAR değeri 153 W/kg olarak hesaplanmıştır. Deri dokusu içerisindeki ölçüm sonuçlarının benzetim sonuçlarıyla, oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3'de görüldüğü üzere anten parametrelerinin diğer literatürdeki bazı çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılan parametreler antenin boyutu, malzemesi, bant genişliği, kazancı ve SAR değeridir.

Tablo 3'de yapılan değerlendirmeler sonucu; SAR değerinin oldukça iyi bir değerde olduğu, diğer parametrelerin ise ortalama değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda tasarımı yapılan antenin, bu alanda tercih edilebilir bir tasarım olduğu sonucuna varılmıştır.

Doku hacminin büyümesi simülasyon sürecini ciddi manada arttırmaktadır. Ayrıca ölçümlerin gerçekleşmesi için oluşturulan fantom sıvının bileşenleri olan kimyasallar oldukça pahalıdır. O yüzden daha az fantom sıvı oluşturmak zorunda kalınmıştır. Antenin doku içindeki konumu yapılan çalışmanın amacına göre değişiklik göstermektedir. Üç katmanlı dokuda deri ve kas doku hemen hemen aynı özellikleri gösterirken, yağ dokunun iletkenlik ve geçirgenlikte yüksek dielektriğinin ise düşük olduğu literatürdeki çalışmalardan yola çıkarak söylenebilmektedir. Geleceğin önemli araştırma konuları bunlar olacaktır. İleriki çalışmalarda; antenin

fabrikasyonu yapılarak fantom ve canlı doku ölçümleri tekrarlanabilir ve bu ölçümler için medikal implant cihaz üretimi gerçekleştirilebilir.

**Tablo 3.** Mevcut çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılması (Comparison of the current study with other studies in the literature)

Kaynak	Boyutlar ve yapı (mm*mm*mm)	Katman Malzemeleri	Bant Genişliği	Maksimum Kazanç (dBi)	SAR (W/Kg)
<b>Karaçolak Vd. 2008</b>	22.5*22.5*2.54 (1265.6 mm <sup>3</sup> ) PIFA	Üst katman Rogers 3210	MICS %20.4	24	-
		Alt katman Rogers 3210	ISM %4.2	7.5	-
<b>Chein Vd. 2010</b>	18*16*1 (288 mm <sup>3</sup> ) Monopol	-	MICS %33.5	24	797
<b>Huang Vd. 2011</b>	10*10*2.54 (254 mm <sup>3</sup> ) PIFA	4 katmanlı Rogers 3210	MICS %21.3	7	341
			ISM %2.5	15	381
<b>Ha Vd. 2011</b>	15.9*12.9*1.6 (328.2 mm <sup>3</sup> ) Patch	Alt katman FR4	MICS %2.5	38	130.5
<b>Kiourti Vd. 2012</b>	12 mm çaplı, 3*0.635 (274.3π mm <sup>3</sup> ) PIFA	Üç katmanlı Rogers 3210	MICS %10.9	39.1	324.7
<b>Lie-Jie Vd. 2012</b>	19*19.4*1.27 (487.8 mm <sup>3</sup> ) PIFA	Üst katman Rogers 3210	MICS %52.6	28	324
		Alt katman Rogers 3210	ISM %5.4	27.6	314
<b>Lie-Jie Vd. 2014</b>	10.02*10.02*0.675 (67.77 mm <sup>3</sup> ) PIFA	Üst katman Rogers 3010	MICS %47.5	30.5	302.4
		Alt katman Rogers 3010	ISM %31.6	19.2	238.9
<b>Yamaç. 2015</b>	10.5*11.5*1.27 (153.35 mm <sup>3</sup> ) PIFA	Üst katman Rogers 3010	MICS %42.1	39	369
		Alt katman Rogers 3010	ISM %5.8	22.9	396.4
<b>Usluer. 2017</b>	14*14*1.27 (248.92 mm <sup>3</sup> ) Patch	Katman Rogers 3010	MICS %20	39.6	354.1
			ISM %6	26	368
<b>Gözel Vd. 2019</b>	16*15*1.5 (240 mm <sup>3</sup> ) Dipol	Katman FR4	UHF %28.8	25	396.8
<b>Mevcut Çalışma</b>	30*28*1.59 (1335.6 mm <sup>3</sup> ) Patch	Katman FR4	ISM %18.7	14.8	153

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Almari, S., Langley, R., J., Alamoudi, A., O., 2013. Improved Performance of 2.45 GHz Implanted Patch Antenna for Wireless Communication. Antennas & Propagation Conference, 11-12 November 2013, Loughborough, UK.
- Armağan, O., Kahrıman, M., 2016. 2.45 GHz, 3.7 GHz Ve 5.8 GHz Frekanslarda Çalışan Üç-Bant Yama Anten Tasarımı, Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi, vol. 4, pp. 189-193.
- Chien, T., Cheng, C., Yang, C., Jiang, C., Luo, C., 2010. Development of Nonsuperstrate Implantable Low-Profile CPW-Fed Ceramic Antennas. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 9, 599-602.
- Doddipalli, S., Kothari, A., Peshwe, P., 2017. A Low Profile Ultrawide Band Monopole Antenna for Wearable Applications. International Journal of Antennas and Propagation, 2017, India, 9 pages.
- Duan, Z., Guo, Y., X., Xue, R., F., Je, M., Kwong, D., L., 2012. Differentially Fed Dual-Band Implantable Antenna for Biomedical Applications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 60(12), 5587-5595.
- Fukunaga, K., Watanabe, S., Yamanaka, Y., 2004. Dielectric Properties of Tissue-Equivalent Liquids and Their Effects on Specific Absorption Rate. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 46(1), 126-129.
- Gözel, M., A., Kasar, Ö., Kahrıman, M., 2019. 868 MHz UHF Bandında H-Şeklinde Katlanmış İmplant Mikroşerit Dipol Anten Tasarımı. DÜMF Mühendislik Dergisi, 10(3), 797-806.
- Ha, J., Kwon, K., Choi, J., 2011. Compact Zeroth-Order Resonance Antenna for Implantable Biomedical Service Applications. Electronics Letters, 47(23), 1267-1269.
- Hall P. S., Hao Y., 2012. Antennas and Propagation for Body-Centric Wireless Communications, 2 nd ed., Artech House, Boston, 2012.
- Huang, W., Kishk, A., A., 2011. Embedded Spiral Microstrip Implantable Antenna. International Journal of Antennas and Propagation, June 2011, 6 pages.
- Karaçolak, T., Hood, A., Z., Topsakal, E., 2008. Design of a Dual-Band Implantable Antenna and Development of Skin Mimicking Gels for Continuous Glucose Monitoring. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 56(4), 1001-1008.
- Kim, J., & Rahmat-Samii, Y., 2004. Implanted Antennas Inside a Human Body: Simulations, Designs, and Characterizations. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 52(8), 1934-1943.
- Kiourti, A., Nikita, K., S., 2012. Miniature Scalp-Implantable Antennas for Telemetry in The MICS and ISM Bands: Design, Safety Considerations and Link Budget Analysis. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 60(8), 3568-3575.
- Kumar, S., A., Raj, M., A., Shanmuganatham, T., 2017. Analysis and Desing of CPW Fed Antenna at ISM Band for Biomedical Application. Alexandria Engineering Journal, 57, 723-727.
- Lee J. H., 2015. Human Implantable Arrhythmia Monitoring Sensor with Wireless Power and Data Transmission Technique, Austin J Biosens & Bioelectron, 1(2), 1008-1014.
- Li-Jie, X., Yong-Xin, G., Wen, W., 2012. Dual-Band Implantable Antenna with Open-End Slots on Ground. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 11, 1564-1567.
- Li-Jie, X., Yong-Xin, G., Wen, W., 2014. Miniaturized Dual Band Antenna for Implantable Wireless Communications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 13, 1060-1063.
- Merli, F., Bolomey, L., Zürcher, J.-F., Corradini, G., Meurville, E., & Skrivervik, A. K. 2011. Design, Realization and Measurements of a Miniature Antenna for Implantable Wireless Communication Systems. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 59(10), 3544- 3555.
- Polat, L., N., Ö., 2011. Elektromanyetik Alan Yayıcı Cihazların Kas Dokusunda oluşturduğu Etkinin Modellenmesi ve Analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, YL Tezi, 65s, Isparta
- See, T., S., P., Qing, X., Chen, Z., N., 2015. Desing and Characterization of on-Head Antenna Systems for Neural Motor Prosthesis. 9 th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 13-17 August April 2015, Lisbon Portugal.
- Singh K., 2005. Biotelemetry: Could Technological Developments Assist Healthcare in Rural India, Rural and Remote Health Journal, 234(5), 1-6.
- Sondas A., Ucar M. H. B., Uras E., 2014. A Dual-Band Implantable Antenna Desing, 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Trabzon, Turkey, 23-25 April.
- Topsakal E., 2009. Antennas for Medikal Applications: Ongoing Research and Future Challenges, International Conference on Electromagnetics in Advanced Application (ICEAA), Torino, Italy.
- Usluer, M., 2017. Tümleyen Yarık Halka Elemanlarını Temel Alan İmplant Anten Tasarımı ve Üretimi. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, YL Tezi, 51s, Antalya.
- Yamaç, Y., E., 2015. Biyomedikal Uygulaması İçin İmplant Edilebilen Mikroşerit Anten Tasarımı ve Üretimi. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, YL Tezi, 46s, Antalya.
- Yang L., Vyas R., Rida A., Pan J., Tentzeris M. M., 2008. Wearable RFID-Enabled Sensor Nodes for Biomedical Applications, 2008 58 th Electronic Component and Technology Conference, Lake Buena Vista, FL, ABD.
- Yeap, K., Voon, C., Hiraguri, T., Nisar, H., 2019. A Compact Dual-Band Implantable Antenna for Medical Telemetry. International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST), 17-19 Dec. 2015, Lahore Pakistan.





## PALPLANŞ DUVARLARDA ÇAKMA DERİNLİĞİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Recep AKAN\*

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Kum,  
Palplanş Duvar,  
Ankraj,  
Derin Kazı,  
Çakma Derinliği.*

### Öz

Bu çalışma kapsamında, yeraltı su seviyesinin 3 m olduğu farklı içsel sürtünme açısına sahip kum zeminlerde 9 m serbest kazı yüksekliğine sahip tek ankrajlı palplanş duvar tasarlanmıştır. Bu tasarım, hesaplanan teorik çakma derinliğinin farklı oranlarda artırılarak ve ankraj derinliği değiştirilerek farklı kombinasyonlarda geleneksel tasarım metodu ile çözülmüş ve ankraj kuvveti ile palplanş kesitinde oluşan maksimum eğilme momentinin değişimi incelenmiştir. Sonuçlar gerçek çakma derinliğinin teorik çakma derinliğine oranı arttıkça ve ankraj derinliği azaldıkça ankraj kuvvetinin azaldığını, maksimum eğilme momentinin ise arttığını ve dalgalı bir davranış sergilediğini göstermiştir. Ankraj kuvveti ve eğilme momentinin minimum olması için ankraj derinliğinin 3.5 m' den küçük ve mümkün olduğunca yukarıda, gerçek/teorik çakma derinliği oranı ise 1.28 – 1.35 civarlarında olması önerilmektedir.

## INVESTIGATION THE EFFECT OF EMBEDMENT DEPTH ON SHEET PILE WALL

### Keywords

*Sand,  
Sheet Pile Wall,  
Anchor,  
Deep Excavation,  
Embedment Depth.*

### Abstract

Within the scope of this study, a single anchored sheet pile wall that has a free excavation height of 9 m has been designed in sand soils which have different internal friction angles where the groundwater level is 3 m. This design has been solved by the conventional design method in different combinations by increasing the calculated theoretical embedment depth in different proportions and changing the depth of anchor so that the variation of the maximum bending moment formed in the anchorage force and sheet pile section has been examined. The results showed that the anchor force decreases and the maximum bending moment increases while the ratio of the actual depth to the theoretical depth of embedment increases and the depth of anchor decreases. In order for the anchorage force and maximum bending moment to be minimum, it is recommended that the anchorage depth is less than 3.5 m and as high as possible, and the actual / theoretical embedment depth ratio is around 1.28 - 1.35.

### Alıntı / Cite

Akan, R., (2020). Palplanş Duvarlarda Çakma Derinliğinin Etkisinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 552-561.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

R. Akan, 0000-0002-9277-1659

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	17.02.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	01.04.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	04.04.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

### 1. Giriş (Introduction)

İnşaat mühendisliğinde zeminde kazı yapma ihtiyacı sıkça karşılaşılan bir durumdur. Özellikle eğimli arazide gerçekleştirilecek baraj, yol ve yapı inşaatları için yapılacak kazılarda öncelikle şev stabilitesi incelenmeli ve şevin duraylılığı sağlanmalıdır (Kilit ve Çavuş, 2019). Kazı yapılacak zeminin kendisini tutabilmesi için kohezyonlu zemin olması gerekir. Aksi durumda zemin kendini tutamayacağından zemin kazısı gereken durumlarda zemin istinat veya palplanş duvar gibi dayanma yapıları ile desteklenmelidir. Kendisini tutamayan granüler zeminlerde ya da kohezyonunun yeterli olmadığı durumlarda kil zeminlerde mutlaka destekli kazı yapılması gerekmektedir.

\* İlgili yazar / Corresponding author: recepakan@hotmail.com, +90-246-211-1197

Bu yapıların tek başına yeterli olmadığı durumlarda ilave uygulama olarak zemine geotekstil malzeme ile güçlendirme işlemi yapılarak zemin stabilitesi artırılabilir (Pınarlık vd., 2017) Bu çalışma kapsamında hesabı gerçekleştirilen ve dayanma yapılarından olan palplanş duvarlar genellikle rıhtım yapıları, batardolar, baraj yapıları, derin kazı sistemlerinde zemini tutan yapılar olarak kullanılabilirler (Amer, 2013). Diğer istinat duvarlarının yapımının aksine, palplanş duvarların inşası genellikle alanın susuzlaştırılmasını gerektirmez (Das, 2014) ve palplanşlar aynı zamanda destekli kazılar gibi bazı geçici yapılar için de kullanılırlar.

Palplanşlar, ankrajlı ve ankrajsız olmak üzere iki farklı şekilde tasarlanabilmekte birlikte genellikle yaklaşık 4-5 m derinliğe kadar olan kazılarda konsol sistem tercih edilebilirken daha yüksek kazılarda ve duvar deformasyonunun önemli olduğu durumlarda ankrajlı sistem tasarlanması uygun olacaktır (NCHRP, 2008).

Ağırlıksız konsol duvarlarda, düşey duvar elemanlarının kayma ve eğilme rijitliği ve bitmiş kazı derinliğinin altındaki topraktan gelen pasif direnç ile destek sağlanır. Ankrajlı duvarlarda ise bu bileşenlere ilaveten ankrajların sağladığı yanal dirençten de istifade edilir (FHWA, 1999).

Palpanş duvarın tasarımı sistemin genel kararlılığı, palpanşın moment dayanımı esasına dayanarak deneme yanılma prosedürü ile yapılmaktadır (Das, 2015). Ankrajlı durumda ankrajların çekme kapasitesi ve gerekli durumlarda duvarın ve arkasındaki zeminin deformasyonu göz önünde bulundurulması gerekebilmektedir.

Ankrajlı sistemlerde ankraja gelecek kuvveti ve dolayısıyla palplanş duvarın en kesitinde meydana gelecek eğilme momentini etkileyen önemli parametre çakma derinliğidir. Sistemin dengede kalabilmesi için gerekli minimum derinlik olmakla birlikte uygulamada bu derinlik belli oranlarda artırılarak gerçekleştirilmektedir. Gerekli minimum çakma derinliğinin ve uygulamada gerçekleştirilecek gerçek çakma derinliği ile ankrajın derinliği ( $I_1$ ) stabilizeyi göz ardı etmeden ekonomikliğe yönelik olarak planlanabilir.

Bu konuyla ilgili Fenerci(2010), yaptığı çalışmada 5 m' den daha yüksek durumlarda aşırı moment artışlarından dolayı maliyetin fazlasıyla dolayı ankraj kullanılmasının uygun olacağını ifade etmiş ve ankraj kullanılması durumunda gerekli duvar yüksekliğinin % 40 civarında azaldığını ortaya koymuştur. Chowdhury vd. (2013), arazide gerçekleşen bir kazı çalışmasını numerik model kullanarak hesaplamış ve arazideki ölçümlerle uyumunu incelemiş, belli kazı, belli gömme derinliği ve çakma derinliği için özel tip payanda düzenlemesi ile mümkün olan en iyi çözüme ulaşılabildiği sonucuna varmıştır. Mahdi ve Ebid (2015), konsol bir palplanş duvarın çakma derinliğinin %20-40 oranında artırılmasının her zaman güvenli ve ekonomik sonuç vermediğini belirtmiş ve optimum çakma derinliğinin seçilmesi için yeni bir yöntem önermiştir. Das, M.R. ve Das, S.K. (2015), killi zeminde inşa edilen konsol ve ankrajlı palplanş duvarın maliyetini düşürebilmek amacıyla optimum ankraj ve çakma derinliği tasarımını incelemiş ve ankraj derinliğini arttırmanın yüksek ankraj kuvvetine neden olurken gerekli çakma derinliğini de azalttığını ortaya koymuştur. Emeraj ve Seleem (2017), Plaxis yazılımını kullanarak çift ankrajlı bir palplanş sistemini farklı kum parametreleri, farklı palplanş rijitlikleri, farklı çakma derinliği ve farklı ankraj derinlikleri için irdeleyen bir parametrik çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda alttaki ankrajda üstteki ankraja göre her zaman daha büyük kuvvetler, daha rijit palplanşta her zaman daha fazla eğilme momenti, daha sıkı zeminde hem daha düşük ankraj kuvvetleri hem de palplanş kesitinde daha düşük eğilme momenti meydana geldiği belirtilmiştir. Almosawi ve Suhail (2019) bir sonlu elemanlar programı ile konsol ve ankrajlı bir sistemi farklı çakma derinlikleri için analiz etmiş, ankraj kuvveti ve eğilme momentlerinin değişimini incelemiştir. Ayrıca, literatürde palplanş duvarın ekonomik olarak optimize edilebilmesi açısından eğilme momenti ve ankraj kuvvetinin değişimini çeşitli programlar vasıtasıyla irdeleyen başka çalışmacılar da mevcuttur (Örnek vd., 2007; Bhanuchitra ve Prusty, 2010; Yazici ve Keskin, 2019).

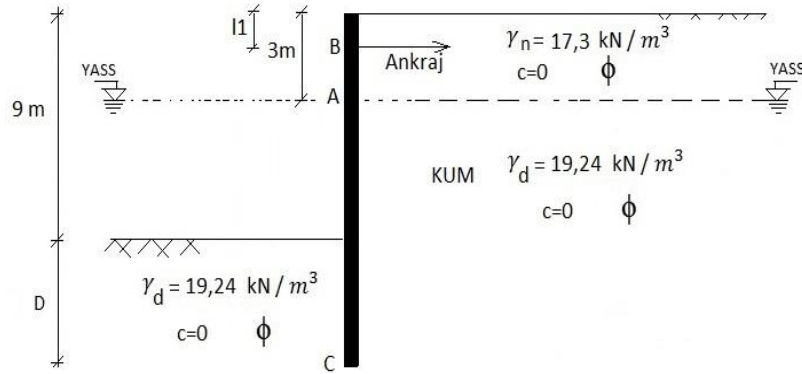
Bu çalışma kapsamında gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zeminlerde tek ankrajlı bir derin kazı sistemi, farklı ankraj derinliği ve gerçek/teorik çakma derinliği oranlarında çözülmüştür. Hesaplar, geleneksel tasarım metodu kullanılarak gerçekleştirilmiş ve çok sayıda kombinasyonun çözülmesi için gerekli iş yükünü hafifletmek adına çözüm algoritması MATLAB R2015a programında kodlanarak ankraj kuvvetleri ve palplanş duvar kesitinde meydana gelecek maksimum eğilme momentleri hesaplanmıştır. Sonuçlar MATLAB R2015a programından matris şeklinde yazdırılmış ve bu sonuçlar düzenlenerek tablo ve grafikler haline getirilmiştir. Farklı ankraj derinliği, farklı zemin koşulları ve farklı palplanş duvar gerçek çakma derinliği oranının ankraj kuvveti ve maksimum eğilme momenti üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu değerlerin minimuma yaklaşması için uygun ankraj derinliği ve uygulamada yapılacak çakma derinliği artışı için uygun oran önerisinde bulunulmuştur.

## 2. Materyal ve Metot (Material and Method)

### 2.1. Problemin Modellenmesi (Modeling the Problem)

Çalışma kapsamında içsel sürtünme açısı  $\phi = 30^\circ$ ,  $\phi = 35^\circ$ ,  $\phi = 40^\circ$  ve  $\phi = 45^\circ$  olan kumlar için farklı modeller

kurulmuştur. Bu modeller de serbest kazı derinliği 9 m ve yer altı su seviyesi YASS = - 3 m olarak sabit değer seçilmiştir. Tasarlanan model Şekil 1' de gösterilmiştir.

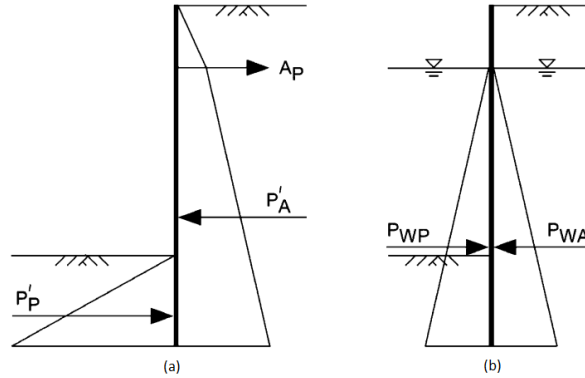


Şekil 1. Zemin profili ve palplanj duvar modeli (Soil profile and sheet pile wall model)

Tek ankrājlı ve zemine ankastre olmayan bir palplanj duvarda meydana gelen maksimum eğilme momentleri ve ankrājlara gelen çekme kuvvetlerinin değişimi incelenmiştir. Bu değişimi incelemek amacıyla her farklı kum zemin modelinde 0.5 m, 1.5 m, 3.5 m, 4.5 m ve 5.5 m derinliklere ankrāj konulmuş ve bu durumlara ait minimum çakma derinlikleri teorik olarak hesaplanmıştır. Bu derinlikler kurulan her model için belirli oranlarda artırılarak (2 katına kadar) çakma derinliği artırma oranının palplanj kesitinde oluşacak maksimum eğilme momentini ve ankrāj kuvvetindeki değişim incelenmiştir.

## 2.2. Problemin Çözümü (Solving the Problem)

Mevcut problemin çözümü için geleneksel tasarım metodu kullanılmıştır. Bu bağlamda, zemine ankastre olmayan palplanj duvarlara gelen aktif ve pasif toprak basıncı ile hidrostatik su basınçları Şekil 2' de gösterilmiştir (Bilgin, 2012).



Şekil 2. Palplanj duvara etkiyen (a) aktif ve pasif toprak yükleri (b) hidrostatik su basınçları ( (a) Active and passive earth pressures (b) hydrostatic water pressures acting on the sheet pile wall) (Bilgin, 2012)

Palplanj duvara gelen tüm yükler aşağıda belirtilen formüller (Eşitlik 1-7) kullanılarak belirlenmiştir;

Aktif toprak basınç katsayısı  $K_a$  :

$$K_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (1)$$

Pasif toprak basınç katsayısı  $K_p$  :

$$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2)$$

Aktif tarafta C seviyesinde etkiyen yatay efektif gerilme  $\sigma'_{hA}$  ve pasif tarafta C seviyesinde etkiyen yatay efektif gerilme  $\sigma'_{hP}$  :

$$\sigma'_{hA} = \sigma'_{vA} * K_a \quad (3)$$

$$\sigma'_{hP} = \sigma'_{vP} * K_p \quad (4)$$

Aktif toprak kuvveti  $P_A$  ve pasif toprak kuvveti  $P_P$ :

$$P_A = \frac{1}{2} * \sigma'_{hA} * (9 + D) \quad (5)$$

$$P_P = \frac{1}{2} * \sigma'_{hP} * D \quad (6)$$

Hidrostatik su basınçları  $P_{WA}=P_{WP}$  ise :

$$P_{WA}=P_{WP}=\frac{1}{2} * \gamma_w * (6+D)^2 \quad (7)$$

olmak üzere palplanş duvara gelen tüm yükler belirlenmiştir. Yapılan hesaplarda suyun birim hacim ağırlığı ( $\gamma_w$ ),  $9.81 \text{ kN/m}^3$  olarak alınmıştır.

Daha sonra yapılacak olan gerekli minimum çakma derinliği, ankraja gelen kuvvetin hesabı ve palplanş en kesitine gelen maksimum eğilme momenti hesabının aşamaları aşağıdaki gibidir.

1) Ankraj noktasında etrafında toplam moment  $\sum M = 0$  koşulunu sağlayan teorik çakma derinliği ( $D_t$ ) belirlenir.

2) Belirlenen  $D_t$  derinliğiyle birlikte tüm sistemin yatay kuvvetler dengesi  $T_x = 0$  koşulunu sağlayan ankraj kuvveti ( $T$ ) belirlenir.

3) Sistemde bilinmeyen kuvvet kalmamıştır ve palplanş en kesitine ankrajın altında kalan bölgede gelecek en büyük eğilme momenti ( $M_{max}$ ) kesme kuvvetinin sıfır olduğu derinlikte ( $z$ ) oluşacaktır. Yatay kuvvet dengesinden  $z$  derinliği belirlenir ve bu noktada meydana gelecek moment hesaplanarak  $M_{max}$  bulunur.

4) Ankraj noktasında oluşacak moment ( $M_B$ ) belirlenir (Eşitlik 8) ve  $M_{max}$  ile kıyaslanarak palplanş en kesitine etkiyecek en büyük eğilme momenti ( $M_{MAKS}$ ) bulunur.

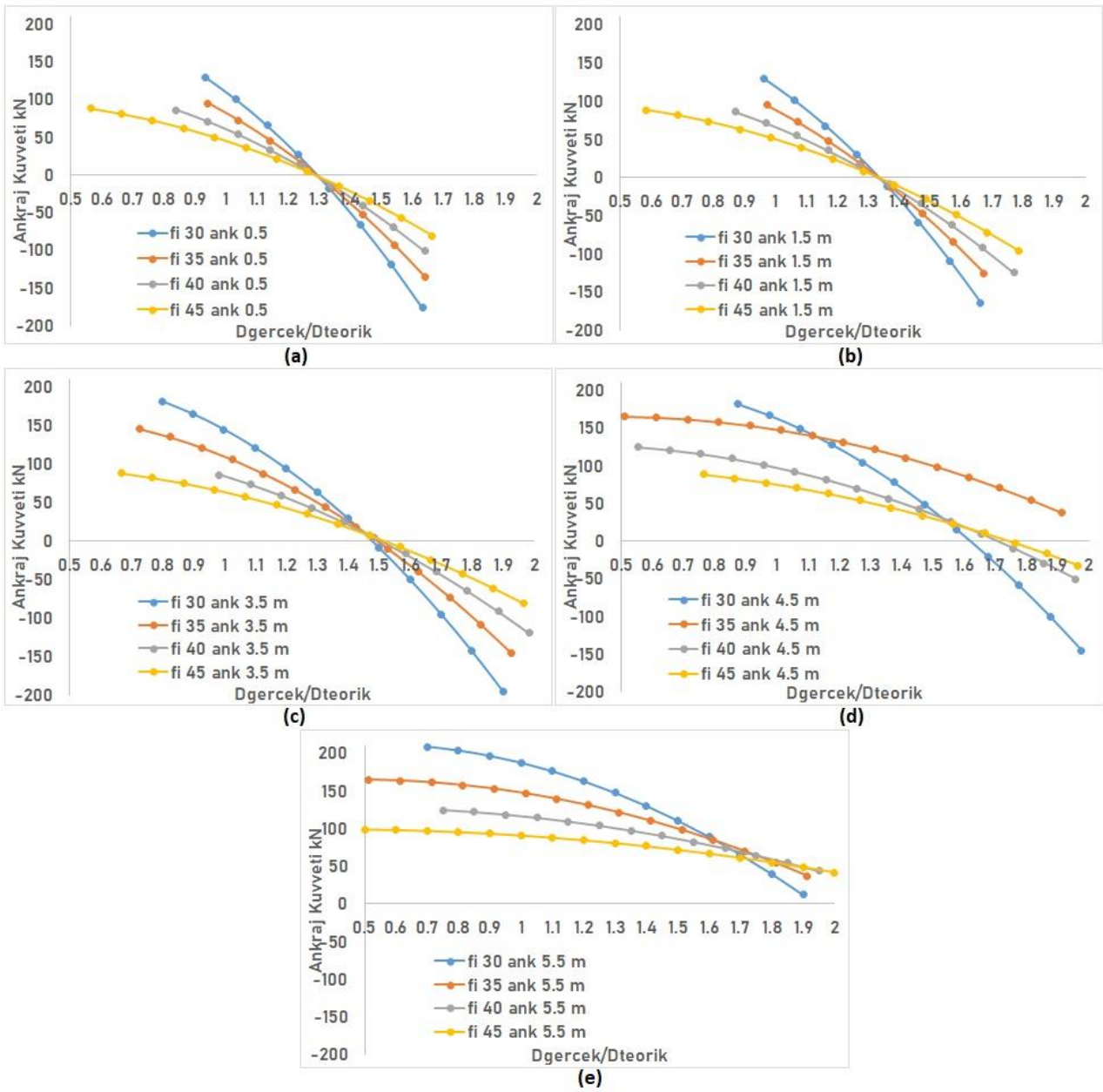
$$M_B = \frac{1}{6} * \gamma_n * K_a * (l_1)^3 \quad (8)$$

Tüm bu işlemler farklı içsel sürtünme açısına sahip kum zemin, farklı ankraj derinliği ve farklı oranlarda artırılmış çakma derinliği kombinasyonları için gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerin elle yapılması bir hayli fazla zaman gerektireceğinden bu hesaplar MATLAB R2015a programında kod yazılarak program vasıtasıyla yaptırılmış ve sonuçlar -grafikler ve tablolar halinde sunulmuştur.

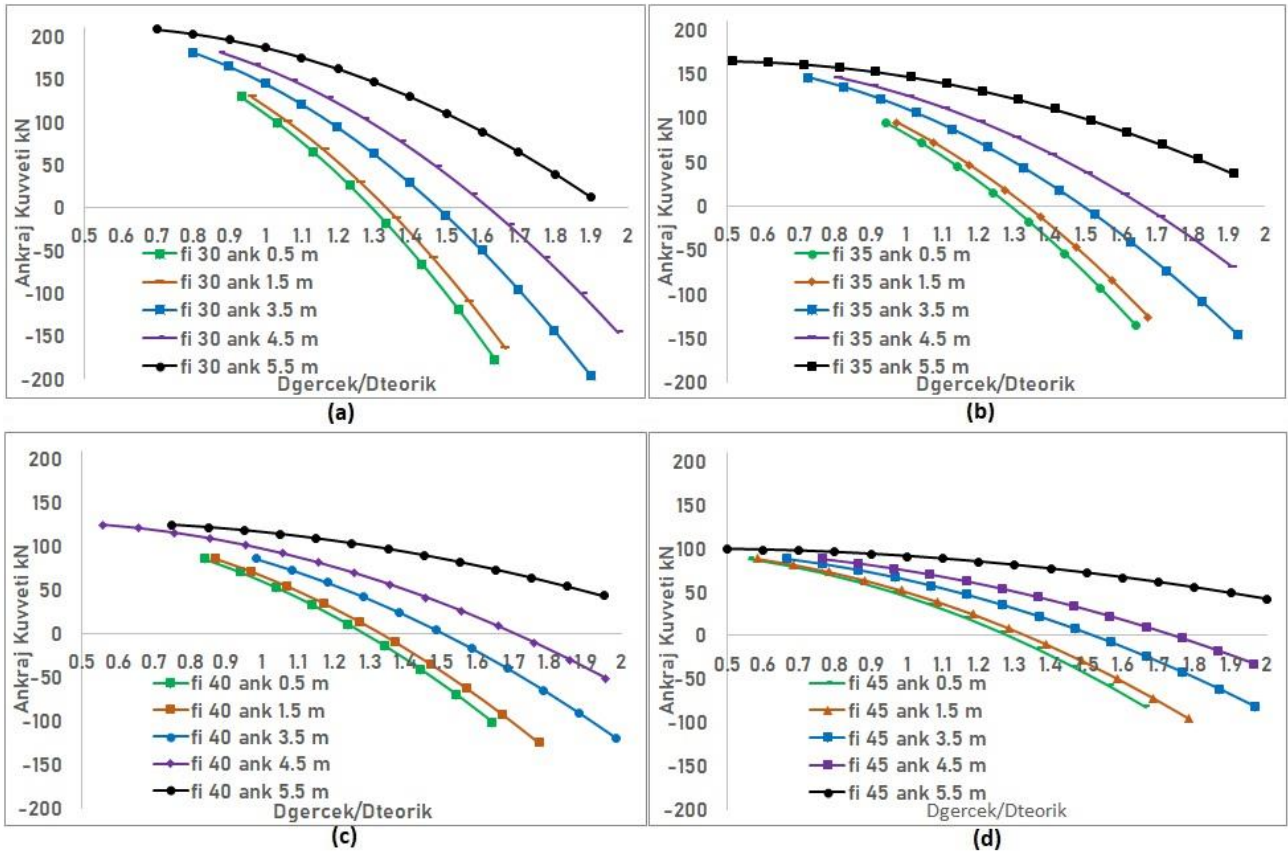
### 3. Araştırma Bulguları ve Tartışma (Results and Discussion)

#### 3.1. Ankraj Kuvveti ile İlgili Sonuçlar (Results of Anchorage Force)

Ankraj kuvveti ankraj derinliği azaldıkça ve çakma derinliği arttıkça azalmaktadır. Ankraj kuvveti belli bir ankraj derinliği için tüm kum zemin için benzer çakma derinliği oranında sıfırlanmakta ve çakma derinliği arttıkça negatif değerlere geçmekte yani basınç alır duruma gelmektedir (Şekil 3). Aynı kum zeminde farklı ankraj derinliğine sahip modellerde ise ankraj kuvvetinin sıfırlandığı ve basınç almaya başladığı çakma derinliği oranı değişiklik göstermektedir. Bu çakma derinliği oranı zeminin içsel sürtünme açısından ( $\emptyset$ ) bağımsız olarak ankraj derinliği 0.5 m, 1.5 m, 3.5 m, 4.5 m ve 5.5 m için yaklaşık olarak 1.3, 1.34, 1.48, 1.62 ve 1.94' tür (Şekil 4).



**Şekil 3.** Ankraj kuvvetinin a) l1=0.5 m b) l1=1.5 m c) l1=3.5 m d) l1=4.5 m e) l1=5.5 m ankraj derinlikleri için farklı gerçek çakma derinliğiyle değişimi (Variation of anchor force with different embedment depths for anchorage depths are a) l1=0.5 m b) l1=1.5 m c) l1=3.5 m d) l1=4.5 m e) l1=5.5 m )



**Şekil 4.** Ankraj kuvvetinin a)  $\phi=30$  b)  $\phi=35$  c)  $\phi=40$  d)  $\phi=45$  olan kum zeminler için farklı gerçek çakma derinliğiyle değişimi (Variation of anchor force with different embedment depths for internal frictions of sand are a)  $\phi=30$  b)  $\phi=35$  c)  $\phi=40$  d)  $\phi=45$ )

### 3.2. Eğilme Momenti ile İlgili Sonuçlar (Results of Bending Moment)

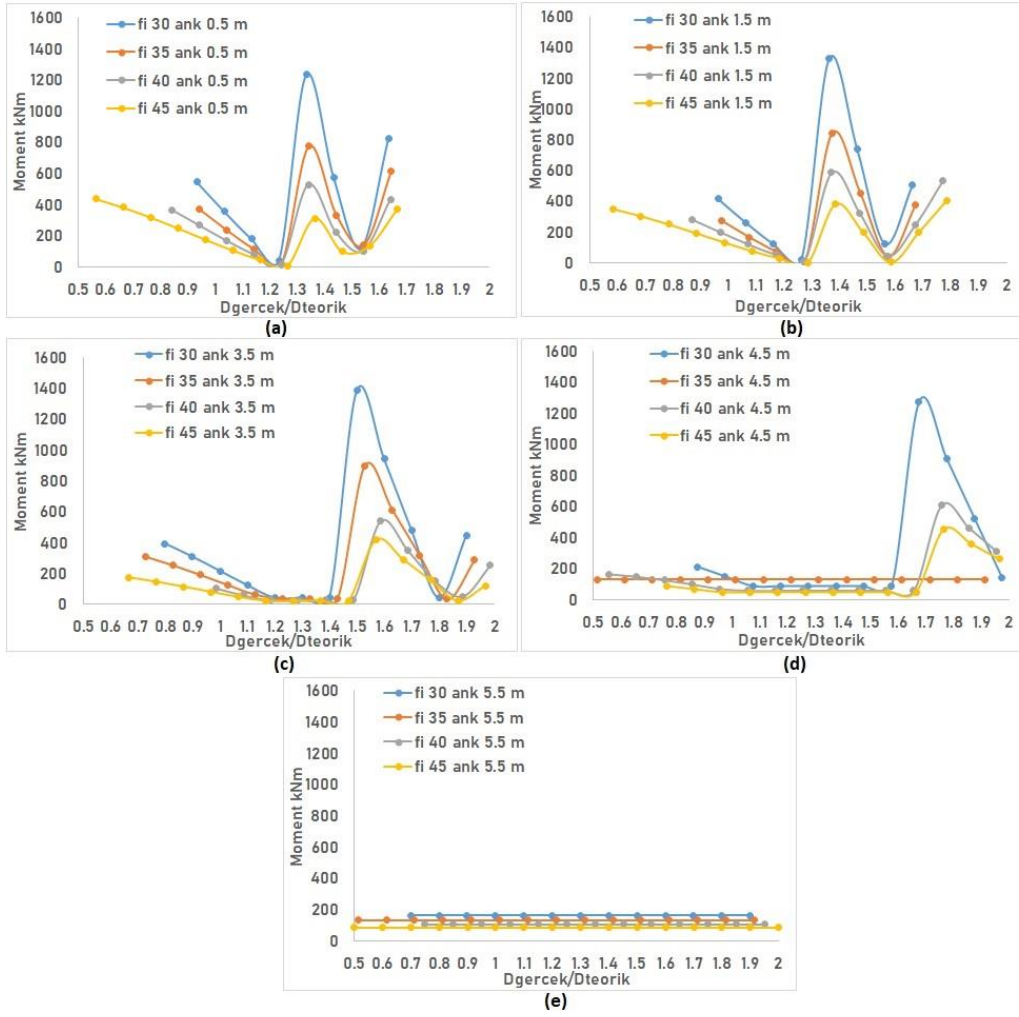
Ankraj seviyesi alt seviyelere indikçe ankraj noktasında meydana gelen  $M_B$  momenti büyümektedir ve bu değer çakma derinliğinden bağımsız olarak sadece ankraj derinliğine bağlıdır. Bu yüzden  $M_B$ , ankrajın altındaki bölgede meydana gelen maksimum eğilme momentinden ( $M_{max}$ ) daha büyük olduğu durumlar için palpaşın tüm kesitinde meydana gelen maksimum moment ( $M_{MAKS}$ ) çakma derinliği artsa bile sabit değerde seyretmektedir (Şekil 5).

$M_{MAKS}$ ' in çakma derinlik oranı ile değişmeyip sabit kaldığı durum 0.5 m ve 1.5 m ankraj derinliği için görülmemekte ancak 3.5 m ve 4.5 m ankraj derinliği için kısmen, 5.5 m ankraj derinliği için ise tüm çakma derinliği oranlarında görülmektedir (Şekil 5).

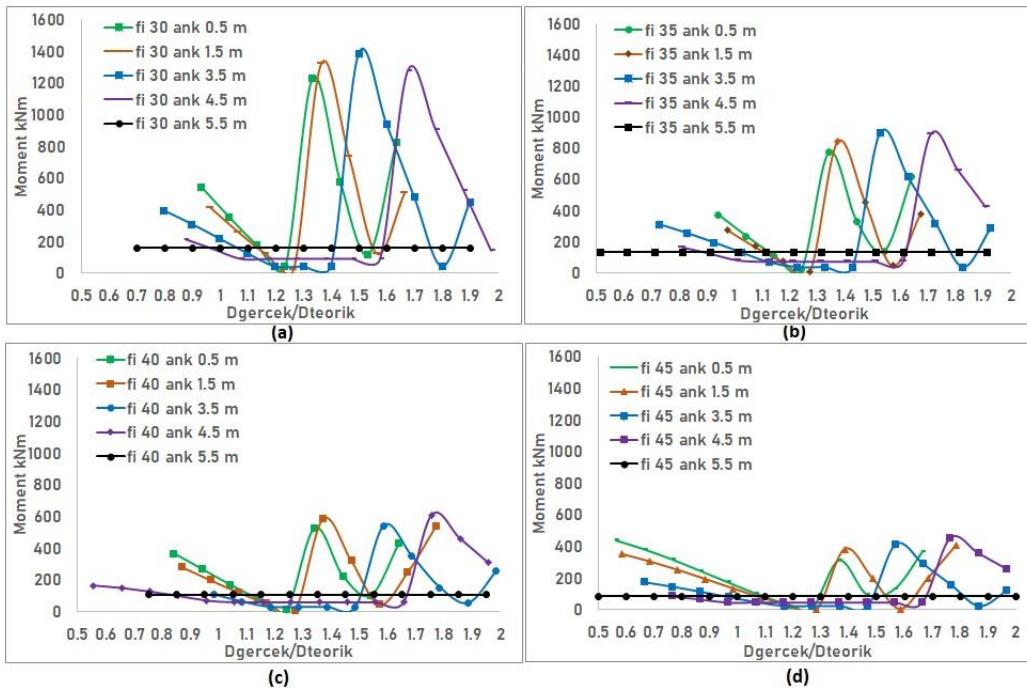
Eğilme momentinin genel olarak  $\phi=30$  olan kum zeminde en büyük ve  $\phi=45$  olan kum zeminde ise en düşük değerlerde olduğu görülmektedir (Şekil 5).

Eğilme momentinin genel davranışına bakıldığında 5.5 m ankraj derinliği hariç çakma derinliğinin artışıyla birlikte ilk olarak azalma, daha sonra ani olarak aşırı bir artış, tekrar azalma ve daha sonra tekrar artış şeklinde dalgalı bir davranış görülmektedir. Davranış dalgalanmalarının olduğu çakma derinliği oranlarının farklı ankraj derinliği durumları için değişkenlik gösterirken zeminin  $\phi$  değerinden genel olarak etkilenmediği görülmüştür (Şekil 6).

İlk azalma davranışından sonra meydana gelen ani moment artışı ankraj kuvvetinin belli bir çakma derinliğinden sonra negatif değerler aldığı çakma derinliği oranına karşılık gelmesinden (Şekil 3-4) dolayı bu durum ankrajın basınç kuvveti almasına bağlı olarak momentin aşırı artması olarak değerlendirilmiştir (Şekil 6).



Şekil 5. Eğilme momentinin a) l1=0.5 m b) l1=1.5 m c) l1=3.5 m d) l1=4.5 m e) l1=5.5 m ankray derinlikleri için farklı gerçek çakma derinliğiyle değişimi (Variation of maximum bending moment with different embedment depths for anchorage depths are a) l1=0.5 m b) l1=1.5 m c) l1=3.5 m d) l1=4.5 m e) l1=5.5 m )



Şekil 6. Eğilme momentinin a) phi=30 b) phi=35 c) phi=40 d) phi=45 olan kum zeminler için farklı gerçek çakma derinliğiyle değişimi (Variation of maximum bending moment with different embedment depths for internal frictions of sand are a) phi=30 b) phi=35 c) phi=40 d) phi=45 )

### 3.3. Uygun Ankraj Derinliği ve Çakma Derinliği Belirlenmesi ile İlgili Sonuçlar (Results of Anchor and Embedment Depth)

Farklı kum zeminler için yapılacak 9 m kazının ankrajlı palplanş tasarımının minimum ankraj kuvveti ve minimum eğilme momenti meydana getirecek şekilde yapılması için belirlenen teorik çakma derinlikleri iki katına kadar artırılmış ve ankraj derinliği 0.5 m' den 5.5 m' ye değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Değerlendirmeler sonucunda bu amaca en yakın değerler etrafında araştırma derinleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 1 ve Tablo 2' de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Farklı zemin ve tasarım kombinasyonlarına ait hesap sonuçları (Results of different soil and design combinations )

$\emptyset$ (°)	l1 (m)	$\frac{D_{gerçek}}{D_{teorik}}$	T (kN)	Mmax (kNm)	M <sub>B</sub> (kNm)	MMAKS (kNm)	
30	0.5	1.280	5.736	-2.525	0.120	2.525	**
30	1.5	1.320	6.274	3.241	3.244	3.244	
30	3.5	1.460	6.268	15.777	41.208	41.208	
30	4.5	1.600	6.418	22.496	87.581	87.581	
30	5.5	1.920	5.983	27.162	159.905	159.905	
35	0.5	1.280	3.021	-0.776	0.098	0.776	**
35	1.5	1.320	4.389	2.580	2.637	2.637	
35	3.5	1.480	3.450	9.286	33.501	33.501	
35	4.5	1.660	0.647	2.684	71.201	71.201	
35	5.5	2.100	1.959	9.581	129.998	129.998	
40	0.5	1.280	1.462	-0.128	0.078	0.128	**
40	1.5	1.320	3.081	1.993	2.116	2.116	
40	3.5	1.500	1.289	3.800	26.881	26.881	
40	4.5	1.700	0.686	2.812	57.132	57.132	
40	5.5	2.280	2.600	12.261	104.310	104.310	
45	0.5	1.280	0.582	0.048	0.062	0.062	**
45	1.5	1.320	2.158	1.502	1.670	1.670	
45	3.5	1.500	2.802	7.241	21.210	21.210	
45	4.5	1.740	0.176	0.751	45.080	45.080	
45	5.5	2.500	0.341	1.766	82.306	82.306	

Tablo 1 yardımı ile her kum zemin durumu için en uygun durumlar elenerek Tablo 2' de bir arada sunulmuştur.

**Tablo 2.** Farklı kum zeminlere ait en uygun ankraj derinliği ve çakma derinliği oranı (Ideal anchorage depths and Dg/Dt ratios of different sand soils)

$\emptyset$ (°)	l1 (m)	$\frac{D_{gerçek}}{D_{teorik}}$	T (kN)	Mmax (kNm)	M <sub>B</sub> (kNm)	MMAKS (kNm)	
30	0.5	1.280	5.736	-2.525	0.120	2.525	**
30	1.5	1.320	6.274	3.241	3.244	3.244	
35	0.5	1.280	3.021	-0.776	0.098	0.776	**
35	1.5	1.320	4.389	2.580	2.637	2.637	
40	0.5	1.280	1.462	-0.128	0.078	0.128	**
40	1.5	1.320	3.081	1.993	2.116	2.116	
45	0.5	1.280	0.582	0.048	0.062	0.062	**
45	1.5	1.320	2.158	1.502	1.670	1.670	

Sonuçlar incelendiğinde serbest kazı derinliği 9 m ve yeraltı su seviyesi 3 m olmak üzere en düşük ankraj kuvveti ve eğilme momentleri tüm kum zeminler için 0.5 m ankraj derinliği ve teorik çakma derinliğinin % 28 artırıldığı durumda elde edilmiştir. Bu durumda gerçek çakma derinliği  $\emptyset = 30$ ,  $\emptyset = 35$ ,  $\emptyset = 40$  ve  $\emptyset = 45$  olan kum zemin için sırasıyla 5.50 m, 4.08 m, 3.04 m ve 2.27 m' dir.



#### 4. Sonuç (Conclusion)

Çalışma kapsamında 9 m serbest kazı yüksekliği ve 3 m yeraltı su seviyesi olan bir zemin profilinde ankrajlı palplanş duvarda farklı kum zemin ve farklı ankraj derinliklerinde ankraj kuvveti ve eğilme momentinin değişimi incelenmiştir.

Ayrıca bu değişime uygulamadaki gerçek çakma derinliği ile teorik olarak gerekli minimum çakma derinliği oranının (Dg/Dt) etkisi incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Ankraj kuvveti, ankraj derinliği azaldıkça ve Dg/Dt oranı arttıkça azalmaktadır.
- Ankraj kuvveti belli bir ankraj derinliği için incelenen tüm kum zeminler için benzer Dg/Dt oranında sınırlanmaktadır.
- Dg/Dt oranı belli bir değeri aştığında ankrajlara gelen kuvvetler negatif olmakta, ankrajlar basınç alır duruma gelmektedir.
- Aynı kum zeminde, farklı ankraj derinlikleri için ankraj kuvvetinin basınç almaya başladığı Dg/Dt oranı değişiklik göstermektedir.
- Eğilme momenti genel olarak  $\phi=30$  olan kum zeminden  $\phi=45$  olan kum zemine doğru azalmaktadır.
- Eğilme momenti 5.5 m ankraj derinliği hariç diğer durumlarda genel olarak Dg/Dt' nin artışıyla birlikte ilk olarak azalma, daha sonra ani bir artış, tekrar azalma ve daha sonra tekrar artış şeklinde dalgalı bir davranış göstermektedir.
- Davranış değişikliklerinin görüldüğü Dg/Dt oranları farklı ankraj derinlikleri için değişkenlik gösterirken zeminin  $\phi$  değerinden genel olarak etkilenmemektedir.
- Eğilme momentinde görülen ilk azalma bölgesinden sonra meydana gelen ani yükseliş, ankraj kuvvetinin negatif değerler almaya başladığı Dg/Dt oranına denk gelmektedir. Bu yüzden aşırı eğilme momenti artışının ankrajın basınç kuvveti alır duruma gelmesi sebebiyle olduğu düşünülmektedir.
- Bazı Dg/Dt oranlarında ankraj seviyesindeki eğilme momentinin ( $M_B$ ) ankrajın alt bölgesinde hesaplanan maksimum momentten ( $M_{max}$ ) daha büyük olduğu görülmektedir. Bu bölgelerde ankrajın alt ve üst bölgelerini kapsayan tüm kesite ait maksimum moment (MMAKS) sabittir. Bunun sebebi  $M_B$  momentinin çakma derinliğinden bağımsız olmasıdır.
- MMAKS değerinin sabit kaldığı bu davranış 0.5 m ve 1.5 m ankraj derinliği için görülmemektedir. Fakat 3.5 m ve 4.5 m ankraj derinliği için kısmen, 5.5 m ankraj derinliği için ise tüm Dg/Dt oranlarında görülmektedir. Bunun sebebi 5.5 m ankraj derinliğinde  $M_B$  momentinin çok büyük olması ve alt bölgede oluşacak momente nazaran büyük olmasıdır.
- Ankraj kuvveti ve eğilme momentinin minimum seviyede olacağı uygun Dg/Dt oranı tüm kum zeminlerde 0.5 m ankraj derinliği için 1.28 civarındadır. Daha büyük çakma derinlikleri için ani moment artışları konusunda hesap gerekmektedir.
- Dg/Dt oranının 1.28 olduğu durumda çakma derinliği  $\phi = 30$ ,  $\phi = 35$ ,  $\phi = 40$  ve  $\phi = 45$  olan kum zemin için sırasıyla 5.50 m, 4.08 m, 3.04 m ve 2.27 m' dir.
- Minimum moment ve ankraj kuvveti elde edebilmek için ankraj mümkün olduğunca yukarıda olmalı ve teorik çakma derinliği % 28 – 32 oran aralığında artırılmalıdır.
- Sonuçlar çalışılan zemin koşulları ve tasarım için geçerlidir. Farklı serbest kazı yüksekliği ve zemin koşulları için sonuçlar irdelenmelidir.

#### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

**Kaynaklar (References)**

- Almosawi, A.J, Suhail, K.S., 2019. Effect of Penetration Depth on the Behaviour of Walling Beam Sheet Piles Using Finite Element Method. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 10(6), 941-952 .
- Amer, H.A.R., 2013. Effect of Wall Penetration Depth on the Behaviour of Sheet Pile Walls. University of Dayton, M.Sc. Thesis. 145p, Dayton.
- Bhanuchitra, M., Prusty, S.B., 2010. Optimal Design of the Shoring System: A Parametric Study. *Indian Geotechnical Conference*, 16-18 Aralık, Mumbai, 223-227.
- Bilgin, Ö., 2012. Lateral Earth Pressure Coefficients for Anchored Sheet Pile Walls. *International Journal of Geomechanics*, 12(5), 584-595.
- Chowdhury, S.S., Deb, K., Sengupta, A, 2013. Estimation of Design Parameters for Braced Excavation: Numerical Study. *International Journal of Geomechanics*, 13(3), 234-247.
- Das, B.M., 2014. *Principle of Foundation Engineering* 8th Edition. Global Engineering, 709p, United States of America.
- Das, M.R., Das, S.K., 2015. Optimal Design of Sheet Pile Wall Embedded in Clay. *The Institution of Engineers*, 96(3), 249-258.
- Emarah, D.A., Seleem, S.A., 2018. A Numerical Study of Anchored Sheet Piles Subjected to Different Types of Sandy Soils Backfill. *Housing and Building National Research Center Journal*, 14, 422-430.
- Fenerci, E., 2010. Palplanş Perdeli Derin Kazı Destek Sistem- lerinde Zemin Kesiti ve Tasarım Yönteminin Etkisi. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 106, Sakarya.
- FHWA-IF-99-015, 1999. *Geotechnical Engineering Circular No 7 Ground Anchors and Anchored Systems*. FHWA, Washington.
- Kilit, M., Çavuş, Ş.U., 2019. Investigation of Influence of Berm Heights, Gradient of Slope Excavation and Groundwater Depths On Safety of Weak Rock Slope, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 7(4), 761-766.
- Mahdi, İ.M., Ebid, A.M., 2015. Optimum Penetration Depth of Cantilever Sheet Pile Walls in Dry Granular Soil Based on Reliability Analysis Concept and Its Impact on the Shoring System Cost. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 4(5), 11-21.
- NCHRP Report 611, 2008. *Seismic Analysis and Design of Retaining Walls, Buried Structures, Slopes and Embank-ments*. NCHRP, Washington.
- Örnek, M., Laman, M., Yıldız, A, Demir, A., Tekinsoy, M.A., 2007. Ankrajlı İksa Sistemlerinin Sayısal Analizi. 2. Geo-teknik Sempozyumu, 22-23 Kasım, Adana, 216-229.
- Pınarlık M., Öztürk Kardoğan P. S., Kılıç Demircan R., 2017. Şev Stabilesine Zemin Özelliklerinin Etkisinin Limit Denge Yöntemi İle İrdelenmesi, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 5(3), 675 - 684.
- Yazıcı, M.F., Keskin, S.N., 2019. İki Ankrajlı Çelik Palplanş Sisteminin Optimum Tasarımı. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 10(1), 34-50.



## KAZMACA-KIRIKKALE EOSEN HAVZASININ JEOLJİK ÖZELLİKLERİ VE KÖMÜR VARLIĞININ ARAŞTIRILMASI

Murat ŞENTÜRK\*

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Tersiyer Havzası, Kömür, Graben, Lagüner, Büyüme Fayı.</i>	Türkiye’de batı ve orta Anadolu Tersiyer havzalarında çok büyük sayılabilecek kömür rezervleri bulunmaktadır. Bu kömür rezervlerinin bulunduğu havzaların jeolojik konumları göz önüne alındığında, bu havzaların tümüyle fay kontrollü asimetrik bir graben yapısına sahip havza özelliği taşıdıkları gözlenir. Büyük bölümü ile fluviyal, gösel ve sığ denizel (lagüner) tortullar tarafından doldurulmuş olan bu Tersiyer havzaları, havzayı sınırlayan sin-sedimenter büyüme faylarının etkisiyle asimetrik bir tortul dolgu geometrisi özelliği kazanmışlardır. Bu havzaları sınırlayan büyüme faylarının etkisiyle, havza içinde bulunan kömürlerin ve eşlik eden tortul birimlerin kalınlığı, faya yaklaştıkça giderek artmış ve bazı kesimlerde yaklaşık 100 metreye ulaşan çok kalın kömürlü zonlar meydana gelebilmiştir.

## INVESTIGATION OF GEOLOGICAL PROPERTIES AND COAL PRESENCE OF KAZMACA-KIRIKKALE EOSEN BASIN (CENTRAL ANATOLIA, TURKEY)

Keywords	Abstract
<i>Tertiary Basin, Coal, Graben, Lagoonary, Growth Fault.</i>	There are giant coal reserves that could be considered in the western and central Anatolia in Turkey Tertiary basin. Most of the basins containing these coal reserves have a basin feature with an asymmetrical graben structure controlled by a fault. These Tertiary basins, most of which are filled by fluvial, lacustrine and shallow marine (lagoonal) sediments, have gained an asymmetrical sedimentary filling geometry with the effect of sin-sedimentary growth faults limiting the basin. With the effect of the growth faults limiting these basins, the thickness of the coals in the basin and the accompanying sedimentary units gradually increased as they approached the fault, and in some sections very thick coal zones could occur.

### Alıntı / Cite

Şentürk, M., (2020). Kazmaca-Kırıkkale Eosen Havzasının Jeolojik Özellikleri ve Kömür Varlığının Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 562-571.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Şentürk, 0000-0002-9672-3021

### Makale Süreci / Article Process

**Başvuru Tarihi / Submission Date** 25.02.2020

**Revizyon Tarihi / Revision Date** 07.05.2020

**Kabul Tarihi / Accepted Date** 17.05.2020

**Yayın Tarihi / Published Date** 25.06.2020

### 1. Giriş (Introduction)

Türkiye’de yer alan Tersiyer yaşlı kömür yatakları daha çok Miyosen ve Eosen yaşlı havzalar içinde depolanmıştır. Türkiye’nin güney bölgelerinde yayılım gösteren Miyosen yaşlı havzalar çoğunlukla denizel olmasına karşın, batı ve orta Anadolu’da yer alan havzaların büyük bir bölümü de, karasal fasiyeste çökelmiş tortullar ile doldurulmuştur. Türkiye’de yer alan linyit rezervlerinin çok büyük bir bölümü, birbirleri ile bağlantılı olabilen, karasal Miyosen havzaları içinde yer almaktadır.

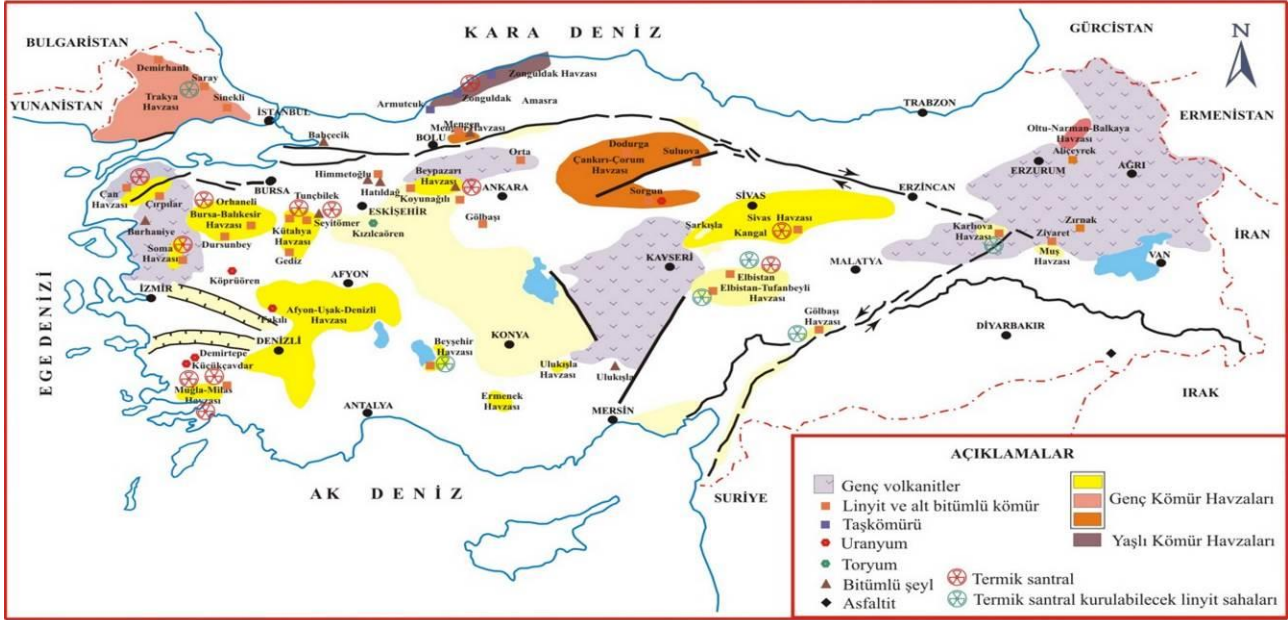
Türkiye’de geniş yayılım gösteren Eosen yaşlı havzalar büyük bölümü ile derin ve sığ denizel ortamda çökelmiş tortul bir istif içerir. Türkiye’nin güney bölgelerinde daha çok derin denizel ortamda çökelmiş olan Eosen

\* İlgili yazar / Corresponding author: muratsenturk@sdu.edu.tr, +90-246-211-1336

havzalarında bulunan kaya toplulukları egemen olarak türbiditler, pelajik karbonatlar ve bunlara eşlik eden volkanik kayalardan meydana gelir (Şekil 1).

Türkiye’de kömür içeren Eosen yaşlı denizel havzalar, büyük bölümü ile Türkiye’nin kuzey bölümlerinde, Ankara-Kırıkkale-Yozgat-Tokat hattının kuzeyinde yer alır. Bu havzalar daha çok neritik ortamda çökelmiş resifal karbonatların yanı sıra, lagüner koşullarda çökelmiş bitümlü şeyl, çamurtaşı, kumtaşı, marn ve bunlara eşlik eden kömür düzeylerinden oluşan tortul istif içerirler.

Kırıkkale’nin kuzeyinde yer alan Kazmaca Eosen havzası, ilginç sayılabilecek jeolojik yapısı nedeniyle, bölgenin en önemli havzalarından biridir.



Şekil 1. Türkiye’deki kömür oluşumlarının yeri ve konumları (Toprak, 2009’dan değiştirilerek) (The location and position of coal in Turkey).

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Kazmaca ve yakın çevresinde yer alan Eosen havzaları, içerdiği kömür damarları ve yansıttığı ilginç jeolojik yapıları nedeniyle önceki yıllarda birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir (Blumenthal, 1948; Birgili vd.,1975; Hakyemez vd.,1986; Kaya ve Dizer, 1982-1983). Adı geçen araştırmacılar, Kazmaca ve yakın çevresinde bulunan havzalardaki Tersiyer yaşlı tortulları sınıflayarak bunların litostratigrafik özelliklerini incelemişlerdir. Kazmaca havzası ve yakın çevresinde yayılım gösteren kaya birimlerinin yanal ve düşey yöndeki stratigrafi özellikleri ve konumlarının yanı sıra, kömür varlığının ortaya çıkarılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır.

## 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

1/500.000 ölçekli bölgesel jeoloji haritasında, Kazmaca Eosen havzasının yayılımı ve inceleme alanı Kazmaca Köyü batısının jeolojik konumu belirlenmiştir.

Havzadaki jeolojik konumların belirlenmesinin yanısıra, yöredeki muhtemel tektonik yapıların ortaya çıkarılmasına yönelik arazi çalışmaları da yapılmıştır.

İnceleme alanındaki her bir litolojik birim değerlendirilmiş, olası kömür varlığının ortaya çıkarılmasına yönelik, kaya birimlerinin yer altındaki konum ve dağılımları ile eşlik eden litofasiyeler de ayrıntılı olarak incelenmiştir.

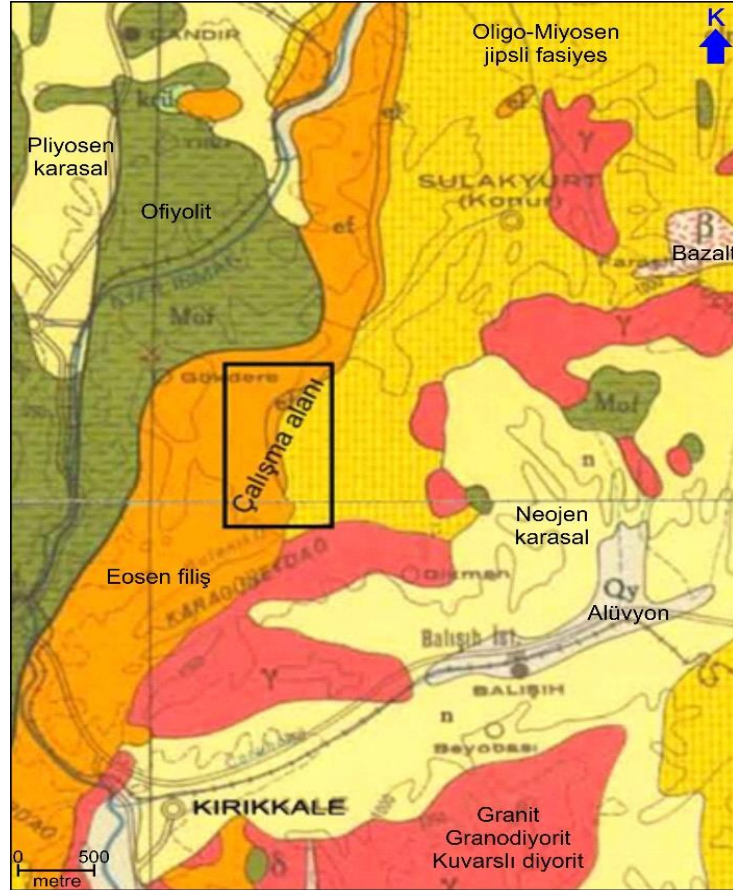
## 4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

### 4.1. Bölgesel Jeoloji (Regional Geology)

Kazmaca Eosen havzası ana çizgilerde Pontid kuşağının güney bölümünde yer alır. Büyük bölümü ile Kuzey Anadolu dağ kuşağını oluşturan Pontidler, Ketin’e (1983) göre, egemen olarak metamorfik masiflerin yanısıra, yaşları Ordovisiyen ile Pliyosen arasında değişen metamorfik olmayan sedimanter kaya toplulukları ile bunlara

eşlik eden volkanik kayalardan yapıldır. Çoğu yerde Pontidlerin güney sınırını oluşturan D-B uzanımlı Kuzey Anadolu Fayı (KAF), Kazmaca Eosen havzasının yaklaşık 100 km kuzeyinden geçer.

Kazmaca-Gökdere (Kırıkkale) arasında KD-GB yönünde uzanım gösteren ve genişliği 4-6 km arasında değişen Kazmaca Eosen havzası, kuzeybatıdan Ahlat ofiyolit karmaşığı, güneyden ise yaşları Geç Kretase-Paleosen arasında değişen Kırıkkale magmatik kaya topluluğuna ait granit, granotoid ve bunlara eşlik eden volkanik kayalar ile çevrelenir (Şekil 2).

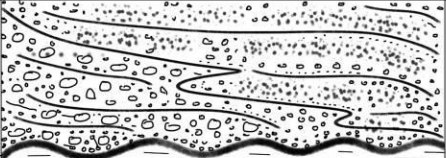
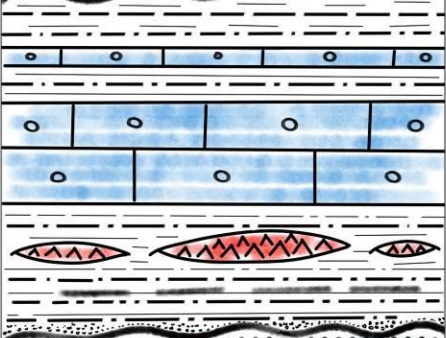
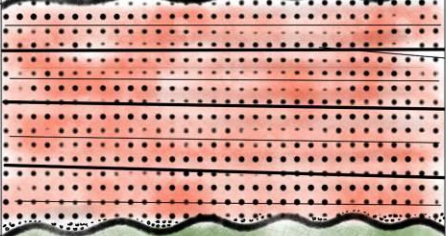



Şekil 2. Kırıkkale ve çevresinin 1/500.000 ölçekli Kayseri ve Sinop paftaları üzerindeki konumu (MTA, 2002) (The location of Kırıkkale and its surroundings on Kayseri and Sinop layouts).

Kazmaca Eosen havzasını kuzeyden sınırlayan ofiyolit karmaşığına ait birimler, havzayı dolduran Paleosen ve Eosen yaşlı birimleri bindirmeli bir dokanağla üstler. Bu bindirmeli dokanağın etkisi ile Kazmaca-Gökdere arasında yayılım gösteren ve kumtaşı-çakıltası ve çamurtaşı araldanmasından oluşan Paleosen yaşlı birimler, şiddetli biçimde kıvrılmış, egemen olarak KD-eksen gidişli antiklinaller ve senklinaller oluşturmuşlardır.

#### 4.2. Stratigrafi (Stratigraphy)

Kazmaca-Gökdere arasında KD-GB yönünde uzanım gösteren ve genişliği 4-6 km arasında değişen Kazmaca Eosen havzası, kuzeybatıdan Ahlat ofiyolit karmaşığı, güneyden ise yaşları Geç Kretase-Paleosen arasında değişen Kırıkkale magmatik kaya topluluğuna ait granit, granotoid ve bunlara eşlik eden volkanik kayalar ile çevrelenir. Kazmacı Köyü batısında bulunan çalışma alanı, büyük bölümü ile Paleosen yaşlı kumtaşı-çakıltası-çamurtaşı araldanmasından oluşan kaba taneli kırıntılı tortullar üzerinde bulunmaktadır. Sahanın doğu bölümünde, yaygın olarak Nummulites fosilleri içeren Eosen yaşlı kireçtaşları ile bunlara eşlik eden kiltası ve çamurtaşından oluşan ince taneli lagüner tortullar yer alır (Şekil 3).

YAŞ	BİRİM	LİTOLOJİ	LİTOLOJİ TANIMLAMA
Kuvaterner			Alüvyon ve Yamaç molozu
Eosen	Kazmaca formasyonu		Kiltaşı, çamurtaşı Nummulitli kireçtaşı Çamurtaşı Nummulitli biyostrom
Paleosen	Karakaya formasyonu		Kumtaşı Çamurtaşı Çakıltası
Kretase	Ahlat Ofiyolit Karmaşığı		Peridotit, serpantinit gabro, diyabaz, çört meta-volkanit kaya bileşenleri

**Şekil 3.** Kazmaca-Eosen havzası ve yakın çevresinde ayırte edilen kaya birimlerine ait genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesiti (Barkurt vd.,1986'dan değiştirilerek) (Generalized stratigraphic vertical section of rock units in Kazmaca-Eocene basin).

Çalışma bölgesinde yayılım gösteren Kretase ve Tersiyer yaşlı kaya birimleri alttan üste doğru (1) Ahlat ofiyolit karmaşığı, (2) Karakaya Formasyonu ve (3) Kazmaca Formasyonundan oluşan üç farklı kaya birimine ayrılmıştır (Şekil 4).

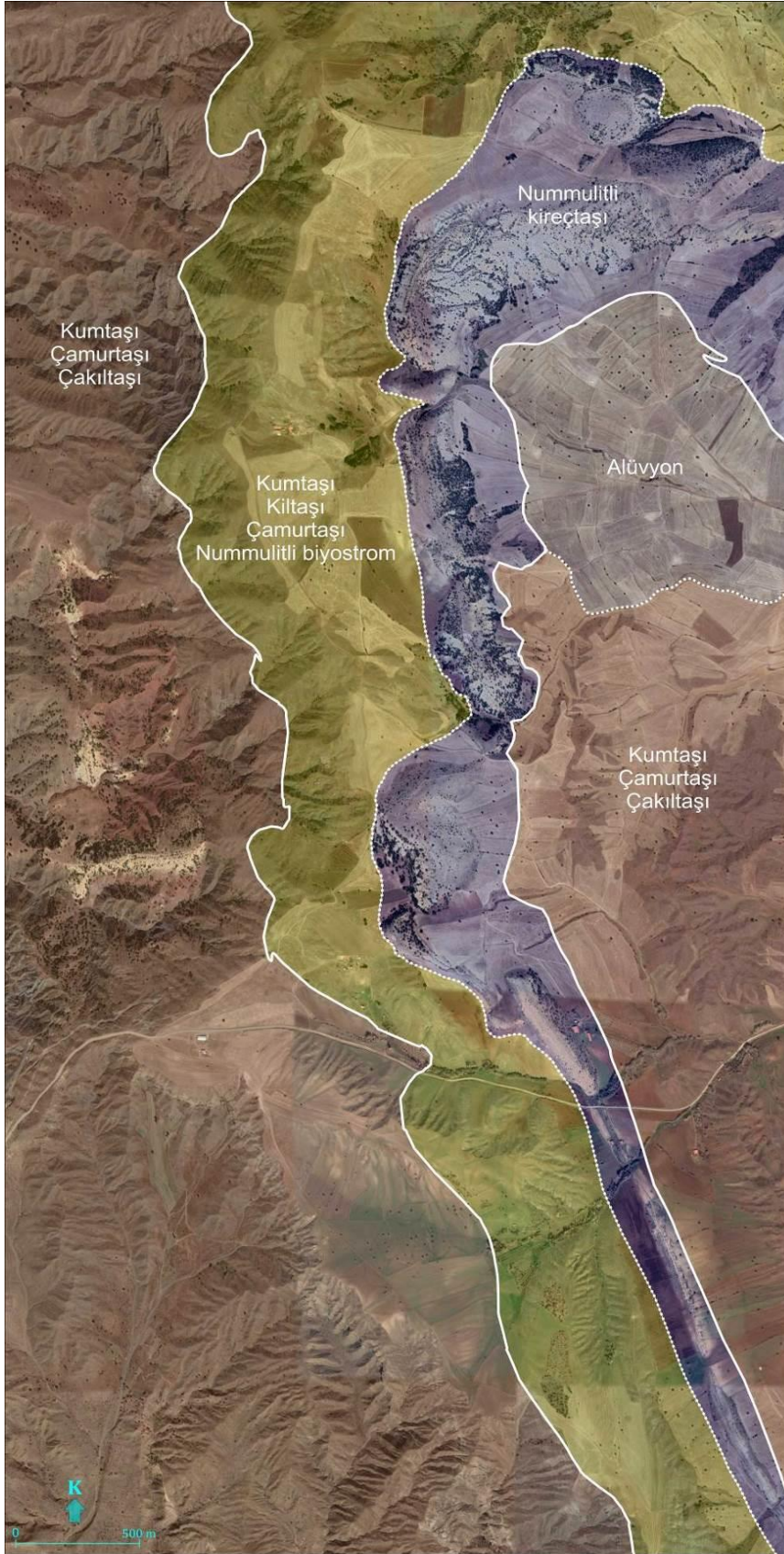
#### 4.2.1. Ahlat Ofiyolit Karmaşığı (Ahlat Ophiolite Complex)

Ahlat ofiyolit karmaşığı, düzensiz ve karmaşık iç yapı özelliği gösteren peridotit, serpantinit, gabro, diyabaz, split, radyolarit, kireçtaşı, kumtaşı, çörtlü kireçtaşı ve meta-volkanit kaya bileşenlerinden yapıldır. Ofiyolitik melanji oluşturan olistolit blokları, türbiditik bir matriks içinde gömülü olarak bulunurlar. Olistolit blokların melanji içindeki dağılımına ilişkin herhangi bir stratigrafik istiflenme yada dizilim gözlenmemiştir. Ahlat ofiyolitik karmaşığı içindeki pelajik karbonatlı kayalarda rastlanan *Globotruncana* sp. varlığına dayanılarak, birimin yaşı için Kretase öngörülmüştür. Birime ait ofiyolitik kayaların melanji benzeri karmaşık iç yapı özelliği göstermesi, bunların daha çok yitim zonlarında (subduction zone) gelişen yığılım prizmasına ait kaya toplulukları olabileceğini gösterir (Şekil 5).

#### 4.2.2. Karakaya Formasyonu (Karakaya Formation)

Kazmacı Köyü batısında bulunan çalışma alanının büyük bölümü Karakaya Formasyonu olarak tanımlanan kaba taneli kırıntılı tortullar üzerinde yer alır.

Karakaya Formasyonu egemen olarak, Paleosen yaşlı kumtaşı, çakıltası, kiltaşı ve çamurtaşı araldanması ile çakıltası kanal dolgu oluşuklarından yapıldır (Şekil 6). Karakaya formasyonu adı daha önce bölgede çalışan Birgili vd.(1975) tarafından birime karşılık gelen tortul kaya topluluğu için kullanılmıştır.



Şekil 4. Çalışma alanı ve yakın çevresinin Google Earth Pro altlıklı uydu görüntüsü üzerindeki litoloji haritası (View of the workspace lithology map on Google Earth Pro).



**Şekil 5.** Ahlat ofiyolit karmaşığının genel saha görünümü (Bakış kuzeye)(General field view of Ahlat ophiolite complex).



**Şekil 6.** Karakaya formasyonuna ait birimlerin genel görünümü (Bakış;KB'ya) (General view of the units of Karakaya formation).

Karakaya formasyonunun egemen bileşeni olan çakıltaşları çoğunlukla yeşilimsi sarı renkte, orta ile iyi pekleşmiş ve kalın ile çok kalın düzenli katmanlıdır. Çakıltaşını oluşturan taneler, kötü boylanmalı, orta ile iyi yuvarlaklaşmış ve ara madde desteklidir (Şekil 7).

Taneler büyük bölümü ile ofiyolitik melanjdan türemiş bileşenlerden oluşur. Üste doğru tane incelmeleri, çapraz katmanlanma ve kiremitvari tane dizilimi, kanal dolgusu çakıltaşları içinde rastlanan olağan tortul yapılardır.

Kumtaşları, yeşilimsi gri, ince ile kaba taneli, kötü boylanmalı ve çoğunlukla çakılıdır. Bileşen taneler egemen olarak ofiyolitlerden türemiş bileşenler içerir.

Karakaya Formasyonunun diğer önemli bir bileşeni olan kıltaşı ve çamurtaşları, birimin üst bölümlerinde kumtaşları ile ardalanmalı olarak gözlenir. Kalınlığı 15-30 cm arasında değişen ve yanal yönde izlenebilen kömür damarları kıltaşı-çamurtaşı kesiti içinde olağan olarak gözlenir (Şekil 8).

Karakaya Formasyonunu oluşturan kaba taneli kırıntılı tortulların yansıttığı sedimantolojik özellikler daha çok fan-delta ortamında gelişen bir çökelin varlığını yansıtır. Birimin üst bölümünde yer alan kömür damarları geçici ve kısa süreli bataklıkların varlığını yansıtmaması bakımından önemlidir.





Şekil 7. Çakıltaşlarının genel görünümü (General view of pebbles).



Şekil 8. Karakaya formasyonunun üst bölümlerinde yeralan kömür damarlarının saha görünümü (Field view of the coal seams in the upper parts of the Karakaya formation).

#### 4.2.3. Kazmaca Formasyonu (Kazmaca Formation)

Çalışma alanının daha çok doğu bölümünde yayılım gösteren ve egemen olarak çamurtaşı, kiltası, Nummulitli kireçtaşı ve organik maddece zengin karbonlu şeyl ve yersel bitümlü şeyl bileşenlerinden oluşan tortul kaya istifi bu çalışmada Kazmaca Formasyonu olarak tanımlanmıştır. Birimin ana bileşeni olan Nummulitli kireçtaşları, açık ile orta grimsi, orta ile kalın düzenli katmanlı, yaygın Nummulites içerikli ve çoğunlukla bağlamtaşı özelliğindedir. Nummulitli kireçtaşları, Kazmaca Formasyonunun orta bölümünde yanal yönde izlenebilen stratigrafik bir kılavuz seviye oluşturur.

Daha çok resifal ortamı simgeleyen Nummulitli kireçtaşı düzeyinin alt bölümünde kiltası, çamurtaşı ile bunlara eşlik eden kumtaşı litolojileri yer alır. Nummulites yığışımından oluşan biyostromal oluşuklar bu bölümde yaygın olarak gözlenir (Şekil 9).



Şekil 9. Nummulites fosillerinin sahadaki görünüşleri (Views of Nummulites fossils in the field).

Kazmaca Formasyonunda Nummulitli kireçtaşlarının üst bölümünde kiltası, çamurtaşı, kireçtaşı araldanmasının yanısıra, lagüner koşullardaki bataklık ortamını simgeleyen, organik maddece zengin bitümlü ve karbonlu şeyl düzeyleri yer almaktadır. Bu bölümde yer alan çamurtaşları ve karbonlu şeyl düzeyleri içinde Nummulites fosil yığışımları olağan olarak bulunur (Şekil 9).

Bunların yanısıra, Kazmaca Formasyonunun üst bölümünde başlıca Ostrea ve gastropodlardan oluşan biyostromal organik yığınaklar yersel olarak gözlenir.

Kazmaca Formasyonuna ait lagüner ve resifal tortullar altta bulunan Karakaya Formasyonuna ait kaba kırıntılı tortulları açısal uyumsuzlukla üstler. Uyumsuz dokanağa ait görünüşleri, Kazmaca batısında kalan alanlarda gözlemek mümkündür.

Kazmaca Formasyonunun içerdiği kaya bileşenleri ve yansıttığı sedimanter özellikler daha çok sığ denizel ortamda, kıyıya yakın bölümde gelişen Nummulitik resif ve buna eşlik eden lagüner ortamların varlığını öngörür. Formasyonun üst bölümünde yer alan organik maddece zengin karbonlu ve bitümlü şeyl düzeyleri, lagüner ortamda indirgen koşullarda çökelmiş olmalıdır.



Çalışma sahası tümüyle Paleosen ve Eosen yaşlı kaya birimleri üzerinde bulunmaktadır. Bu sahanın batısında daha çok Paleosen yaşlı kaba kırıntılı tortullar egemen olmasına karşın, sahanın doğu bölümünde Eosen yaşlı Nummulites’li birimler yayılım göstermektedir.

Yörede yapılan arazi çalışmaları sonucunda, Eosen yaşlı Nummulites fosilli tortul istif içinde, karbonlu ve bitümlü şeyden oluşan ve lagüner ortamı simgeleyen organik maddece zengin düzeylerin bulunduğu tespit edilmiştir. Lagüner ortamda çökelen organik maddece zengin bu düzeylerin yanal yönde kömür katmanlarına dönüşme olasılığı bulunmaktadır. Bu olasılığın araştırılması için çalışma sahası ve yakın çevresinde, sondaj çalışmalarının yapılması uygun olacaktır. Yapılacak araştırma sondaj çalışmaları sonucunda elde edilecek veriler doğrultusunda, çalışma alanı içerisindeki olası kömür rezervlerinin hesaplanması mümkün olacaktır.

### **Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)**

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

### **Kaynaklar (References)**

- Birgili, Ş., Yoldaş, R. ve Ünal, G., 1975. Çankırı-Çorum havzasının jeolojisi ve petrol olanakları: MTA Rap. No: Rap.5621.
- Blumenthal, M.M., 1948. Bolu civarı ile Aşağı Kızılırmak Mecrası arasındaki Kuzey Anadolu Silsilelerinin jeolojisi: Maden Tetkik ve Arama Enst., Seri B, No. 13, 265 s., Ankara.
- Hakyemez, Y., Barkurt, M.Y., Bilginer, E., Pehlivan, Ş., Can, B.; Dağ, Z., Sözeri, B. 1986. Yapraklı-İlgaz-Çankırı-Çandır dolayının jeolojisi. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No:7966, Ankara (yayımlanmamış).  
<http://www.google.com.tr/intl/tr/earth>
- Kaya, O. ve Dizer, A., 1982. Bolu kuzeyi Üst Kretase ve Paleojen kayalarının stratigrafisi ve yapısı. M.T.A. Dergisi, 97/98, 57-77, Ankara.
- Kaya, O. ve Dizer, A., 1983. Ereğli (Zonguldak) alanının Krerase stratigrafisi, MTA Enstitüsü Dergisi, Sayı, 99/100, s.19-34, Ankara.
- Ketin, İ.,1983. Türkiye jeolojisine genel bir bakış, İTÜ Maden Fakültesi Yayınları, Yayın No: 32, Türkiye.
- Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü (MTA) 2002, 1/500.000 ölçekli Kayseri ve Sinop harita paftası, Ankara.
- Toprak, S. (2009) 'Petrographic properties of major coal seams in Turkey and their formation', International Journal of Coal Geology, Vol. 78, No. 4, pp.263-275.



## YERE NÜFUZ EDEN RADAR YÖNTEMİ İLE BALAST KİRLİLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet Çağrı BAYRAK<sup>1\*</sup>, Mesut TİĞDEMİR<sup>2</sup>, Mustafa KARASHAHİN<sup>3</sup>, Olcay ÇAKMAK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Deprem ve Jeoteknik Araştırma Merkezi, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>3</sup> İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Balast Kirliliği, GPR, Demiryolu, Demiryolu Altyapısı.</i>	Bu çalışmada, demiryolu altyapısındaki kirlenmeye bağlı kusurları yere nüfuz eden radar (GPR) kullanarak tespit etmek amacıyla İstanbul-Edirne demiryolu hattının Çatalca bölgesinde çalışmalar yürütülmüştür. Yenilenen demiryolu hattında yenileme çalışmalarından önce ve sonra ölçümler yapılmıştır. Ayrıca balast numunesi alınarak kirlilik derecesi belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmeye göre eski demiryolunda balast tabakasının aşırı deformasyonu, balast cepleri ve balast kirliliği tespit edilmiştir. Yenileme sonrasında altyapı tabakaları tespit edilmiştir. Eski ve yeni demiryolu hattında yapılan radar ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

## DETERMINATION OF BALLAST FOULING VIA GROUND PENETRATING RADAR

Keywords	Abstract
<i>Ballast Fouling, GPR, Railway, Railway Infrastructure.</i>	In this study, investigations are carried out in the Çatalca region of the Istanbul-Edirne railway line in order to detect defects related to the contamination in the railway infrastructure using ground penetration radar. Measurements are performed before and after the renovation works on the renewed railway line. In addition, the ballast sample is taken, and the degree of fouling is determined. According to the evaluation, excessive deformation of the ballast layer, ballast pockets and ballast fouling are detected in the old railway. Infrastructure layers are determined after the renovation. The radar measurement results on the old and new rail lines are presented comparatively.

### Alıntı / Cite

Bayrak, M.Ç., Tığdemir, M., Karashahin, M., Çakmak, O., (2020). Yere Nüfuz Eden Radar Yöntemi ile Balast Kirliliğinin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 572-581.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M.Ç Bayrak, 0000-0002-9995-7325  
M. Tığdemir, 0000-0002-5303-2722  
M. Karashahin, 0000-0002-3811-2230  
O. Çakmak, 0000-0003-4282-4481

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	27.02.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	13.04.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	29.04.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Gelişen ülkelerde demiryolları hem yolcu taşımacılığında hem de yük taşımacılığında ekonomiye katkı sağlamaktadır. Demiryolu taşımacılığının artması karşılaşılan sorunları da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla yüksek yatırım maliyetleriyle yapılan demiryollarındaki kusurların erken tespiti, bakım çalışmalarının zamanında yapılması için önemlidir.

Ülkemizde demiryolları üstyapısı genellikle balastlı tipte yapılmaktadır. Dinamik tren yüklerinin etkisi altındaki demiryolu altyapısında başta balast kirliliği olmak üzere zamanla bozulmalar meydana gelmektedir. Balast daneleri arasına giren ince malzemelerin balast tabakasının boşluklarını doldurmasına balast kirlenmesi denilmektedir, böylece kirlenen balast tabakası fonksiyonlarını yerine getiremez. Demiryollarının ekonomik ve stratejik öneminden dolayı karşılaşılan sorunların irdelenmesi ulaştırma mühendisliği için özel bir öneme sahiptir. Bu nedenle, demiryollarında karşılaşılan bozulmalar ile ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır. Selig ve Waters

\* İlgili yazar / Corresponding author: mcbayrak@yahoo.com, +90-246-211-1600

(1994) demiryolu bozulması olarak balast kirliliği kavramını tanımlamış ve balast tabakasını kirlenme derecesine göre sınıflandırmıştır. Indraratna vd. (2011) balast kirliliğinin sınıflandırılması ve değerlendirilmesi için yeni bir parametre önermiştir. Huang ve Tutumluer (2011) kirlenmenin balast mukavemeti ve stabilitesi üzerindeki etkisini belirlemiştir. Indraratna vd. (2014) doğrudan kesme deneyi uyguladığı temiz ve kömür tozu ile kirlenmiş numuneleri ayrık eleman yöntemi ile modellemiş ve elde ettiği analiz sonuçları ile karşılaştırmıştır. Ebrahimi vd. (2014) balast tabakasını kirlletici malzemenin kohezyonsuz ve kohezyonlu olmasına göre iki farklı kirlenme indeksi önermiştir. Esmaeili vd. (2014) kumla kirlenmiş balastın tren yüklerinden kaynaklanan titreşim üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırarak balast kirlenmesini ivme ve yerdeğiştirme ile ilişkilendirmiştir. Parsons vd. (2014) balast kirlenmesi ile geçirgenliği arasındaki ilişkiyi rezistivite yöntemi kullanarak incelemiştir. Danesh vd. (2018) balast kirliliğinin derecesinin kayma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmıştır. Kashani vd. (2018) yaptığı üç eksenli testler ile kirlenmenin ve kirlenmeye bağlı olarak tutulan su içeriğinin balast tabakasının mukavemet ve bozulma özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir.

Balast kirliliğinin demiryolu altyapısı bakımından önemli bir problem olması nedeniyle literatürde oldukça yoğun çalışma alanına sahiptir. Pratik olmasından dolayı tercih edilen GPR ile yapılan çalışmalar çoğunluktadır. Olhoeft ve Selig (2002) balast ve altbalast tabakalarının kalınlığını, yol boyunca tabaka kalınlıklarındaki değişimleri, balast içindeki su ceplerini ve yüksek su muhtevasına sahip taban zemini gibi demiryolu altyapısının özelliklerini gözlemlemiştir. Al-Qadi vd. (2010) demiryolu altyapı değerlendirmesi için çoklu frekansa sahip yer radarı sisteminde, radar analiz sonuçlarını balast gradasyon deneyleri ve gözlem çukuru ile birlikte doğrularak anten optimizasyonu yapmıştır. Shao vd. (2011) balast koşullarını değerlendirmek için otomatik bir sınıflandırma sistemi sunmuştur. Anbazhagan vd. (2011) tahribatsız testler olarak sismik yüzey dalgası ve GPR yöntemlerini kullanarak balast kirlenme derecesinin ve kirlenme türlerini belirlemiştir. Fontul vd. (2016) bozulma nedenlerini tespit etmek amacıyla Portekiz demiryolu ağında radar ölçümlerine dayalı vaka çalışması gerçekleştirmiştir. Benedetto vd. (2017) çalışmasında demiryolu balast koşullarının değerlendirilmesi ve izlenebilmesi için yeni ve etkili bir sinyal işleme yöntemi önermiştir. Tosti vd. (2018) düşükten yükseğe kadar farklı frekanslardaki radar antenlerini kullanarak laboratuvar ortamında balast kirliliğinin dielektrik geçirgenliğine ilişkin bir çalışma yapmıştır. Yurlov vd. (2019) Radar parametreleriyle geometrik bozulmaların oranları arasındaki istatistiksel ilişkiyi incelemiş, ayrıca radar parametrelerine bağlı olarak bir tahmin modeli geliştirmiştir.

Bu çalışmada, demiryolu altyapısındaki kirlenmeye bağlı kusurları GPR kullanarak tespit etmek amacıyla İstanbul-Edirne demiryolu hattının Çatalca bölgesinde çalışmalar yürütülmüştür. Yenilenen demiryolu hattında yenileme çalışmalarından önce ve sonra olmak üzere aynı yerde ölçümler yapılmıştır. Ayrıca balast numunesi alınarak kirlilik derecesi belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmeye göre eski demiryolunda balast tabakasının aşırı deformasyonu, balast cepleri ve balast kirliliği tespit edilmiştir. Yenileme sonrasında altyapı tabakaları tespit edilmiştir. Eski ve yeni demiryolu hattında yapılan radar ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bir demiryolunun olabilecek en kötü ve en iyi durumu görüntülenmiştir.

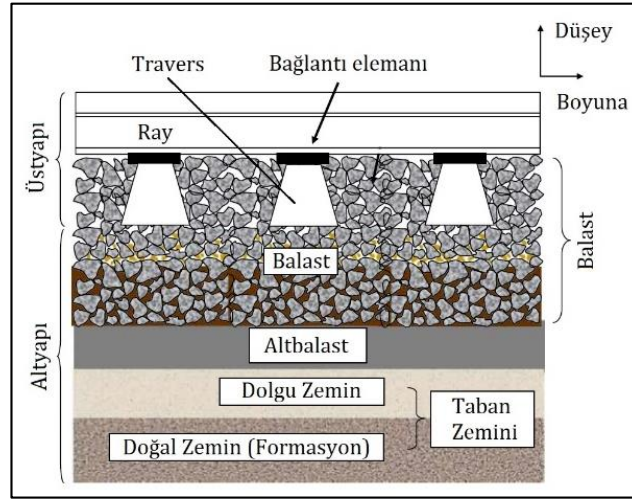
## 2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

### 2.1. Balast Kirliliği (Ballast Fouling)

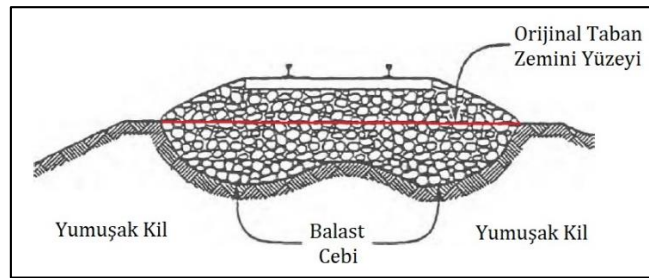
Şekil 1'de görüldüğü gibi balastlı tipteki bir demiryolunda, raylar, traversler ve bağlantı elemanları üstyapıyı oluştururken, balast, altbalast ve taban zemini altyapıyı oluşturur (Al-Qadi vd., 2008). Ayrıca taban zemininin durumuna göre altbalast tabakasının altına takviye tabakaları da ilave edilebilir. Ray-travers birleşiminden aktarılan gerilmeleri ilk olarak karşılayan balast tabakası altyapının en önemli elemanıdır.

Sert taşlar ve kayaçlardan imal edilen balast tabakası, esnekliği sayesinde dinamik kuvvetleri sönmüleyerek, altyapı tabakalarına iletilen gerilmeleri azaltabilmeli ve yeterli drenajı sağlayabilmelidir. Bununla birlikte, balast tabakasında zamanla bozulmalar meydana gelir.

Balast kirlenmesi sonucunda drenaj özelliğini kaybeden altyapıda bozulmalar ve plastik deformasyonlar meydana gelmektedir. Kirlenme seviyesine ve uygulanan tekrarlı yüklere bağlı olarak ilerleyen aşırı deformasyonların sonucunda balast cepleri meydana gelmektedir. Şekil 2'de tipik bir balast cebinin şekli yer almaktadır (Li vd. 2016).



Şekil 1. Demiryolu yapısı (Railway structure)



Şekil 2. Taban zemininin aşırı plastik deformasyonu - balast cebi (Excessive plastic deformation of subgrade - ballast pocket)

Selig ve Waters, (1994) çalışmalarında, balast kirliliğini deneysel olarak belirlemek için kirli ve temiz balasttan 15 kg'dan az olmayacak şekilde numuneler almışlar ve balast kirliliğini gösteren kirlilik indeksini ( $FI$ ), aşağıdaki şekilde hesaplamışlardır;

$$FI = P4 + P200 \quad (1)$$

Burada,  $P4$ ; 4 nolu elekten geçen yüzde ve  $P200$ ; 200 nolu elekten geçen yüzde değeridir.

Hesaplanan kirlenme indeksine göre Tablo 1'deki sınıflandırmaya göre balast tabakasının kirlenme derecesi tespit edilmektedir.

Tablo 1. Kirlenme kriteri (Fouling criteria)

Kategori	Kirlenme indeksi
Temiz	<1
Kısmen temiz	1-9
Kısmen kirli	10-19
Kirli	20-39
Çok kirli	>39

## 2.2. GPR Çalışması (GPR Study)

GPR kullanılarak demiryolunun altyapı tabakalarının durumları ve balast kirliliği belirlenmektedir. Radarın yaydığı elektromanyetik dalgalar altyapı tabakalarından yansımakta ve altyapı tabakalarının durumunun belirlenmesini sağlamaktadır. Homojen ve izotropik malzemeler için radar dalgasının rölatif yayılma hızına bağlı olarak aşağıdaki eşitliklerden hesaplanmaktadır (Daniels, 2004);

$$v_r = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

$$d = v_r \frac{t}{2} \quad (3)$$

Burada,  $v_r$ ; rölâtif yayılma hızı (m/s),  $c$ ; ışık hızı ( $3 \times 10^8$  m/s),  $\epsilon_r$ ; dielektrik sabiti,  $d$ ; tabaka kalınlığı (m),  $t$ ; radar sinyalinin gidiş-geliş süresi (s).

İstanbul-Çatalca bölgesinde yer alan demiryolunun yenilenmesi çalışmaları sırasında GPR ölçümleri yapılmıştır. Yenileme çalışmaları başlamadan önce GPR ölçümleri yapılmış ve eski yol kaldırılıp yenisi yapıldıktan sonra ölçümler tekrarlanmıştır. Bu sayede bir demiryolunun en kötü durumu ve aynı zamanda en iyi durumu tespit edilmiştir.

Ölçümlerde IDS marka 600 MHz ve 1600 MHz frekanslarda eş zamanlı ölçüm yapan çift antenli bir radar cihazı kullanılmıştır. Balast tabakasının görüntülenmesinde genellikle yüksek frekanslı antenler kullanılmasına rağmen, yüksek frekanslı antenler altyapı tabakalarını görüntülemek için yeterli gelmemektedir. İncelenen demiryolunda toplam kalınlığı 2 m'yi geçen altyapı tabakalarını görüntülemek için daha derine nüfuz eden 600 MHz antenden elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Ölçümler raylarda giden 4 tekerlekli bir GPR taşıyıcı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Demiryolu GPR uygulaması (Railway GPR application)

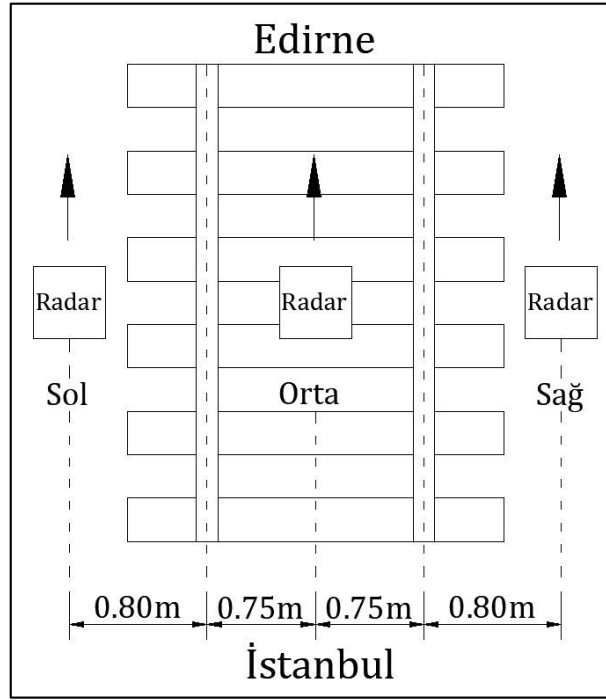
GPR ile hattın ortasından yapılan ilk deneme ölçümlerinde beton traverslerin radar sinyallerini yansıttığı ve bunun sonucunda görüntünün netliğinin oldukça azaldığı belirlenmiştir. Radar sinyallerinin beton traverslerden yansımaları önlemek için traverslerin 5cm kadar dışından da ölçüm yapılarak radar sinyallerinin doğrudan demiryolunun alt tabakalarına iletilmesi sağlanmıştır.

Çalışmalarda kullanılan radar anteni bir tane olduğu için hattın ortasından, solundan ve sağından yapılan ölçümler başlangıcı ve bitişi işaretlenen kesimde tekrarlanarak yapılmıştır (Şekil 4). Yenileme çalışmalarından sonra yapılan ölçümler hattın ortasından ve solundan yapılmıştır. Yenileme sonrası yapılan ölçümler sırasında incelenen demiryolunun altyapısında henüz bozulma olmadığı için tek taraftan yapılan ölçüm yeterli görülmüştür. Verilerin değerlendirilmesi aşamasında Reflexw programı kullanılmıştır. Uygulanan filtreleme işlemleri sonucunda sinyal kaydındaki (radargram) gürültüler azaltılmış, altyapı tabakalarının ara yüzeyinden yansıyan sinyallerin genlikleri artırılmış ve tabaka sınırları daha belirgin hale getirilmiştir.

Yenileme sonrası demiryolu hattının toplamda 2.20 m derinliğe ulaşan altyapı tabakalarının tasarım ve uygulama kalınlıkları aşağıda yer almaktadır.

- Balast 0.30 m,
- Altbalast 0.20 m,
- Alttemel 0.40 m,
- Dolgu: 0.60 m,
- Kaya dolgu 0.70 m'dir.





Şekil 4. Radar ölçüm konumu ve yönü (Radar measurement position and direction)

#### 4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

##### 4.1. Balast Kirliliği Sonuçları (Ballast Fouling Results)

Kirli balast malzemesi incelendiğinde içerisinde bazalt, kireç taşı ve nehir taşı malzemelerine rastlanmıştır. Şekil 5'te kirli balast daneleri yeni balast daneleri ile birlikte görülmektedir.



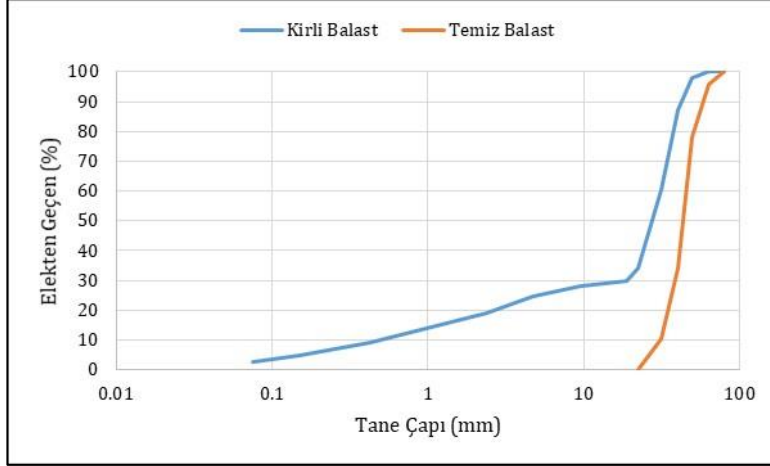
Şekil 5. Balast daneleri (Ballast particles)

Eski demiryolu kaldırılırken alınan kirli balast numuneleri üzerinde kirlenme analizleri yapılmıştır. Eleme işlemi yaklaşık 15 kg'lık kirli balast numunesi üzerinde yapılmıştır. Kirli balastın içerisinde bulunan yeni balast danelerinin boyutlarını belirlemek için numuneler ilk olarak balast eleklerinden elenmiştir. Balast eleklerinden elendikten sonra en küçüğü 200 nolu elek olmak üzere balast eleklerinden daha küçük çaplı elekler kullanılmıştır. 4 nolu ve 200 nolu eleklerden geçen malzeme miktarı hesaplanarak Tablo 1'deki kriterlere göre kirlenme seviyesi belirlenmiştir. Eleme işlemi uygulanan malzeme Şekil 6'da yer almaktadır.

Şekil 7'de yenileme öncesi alınan kirli balast numunesinin yenileme sonrası alınan temiz balast numunesi ile karşılaştırılması yer almaktadır. İçinde ince malzeme bulunmayan açık gradasyona sahip temiz balast daneleri dinamik yüklerin etkisi altında zamanla kırılarak ufalanmaktadır. Balast kırılması ve çevreden taşınan ince malzemelerin etkisiyle temiz balast kirli balast haline dönüşmektedir. Kirlenmeye bağlı olarak gradasyon eğrisi sola doğru kaymaktadır.



Şekil 6. Kirli balast (Fouled ballast)



Şekil 7. Kirli ve temiz balast gradasyonu (Fouled and clean ballast gradation)

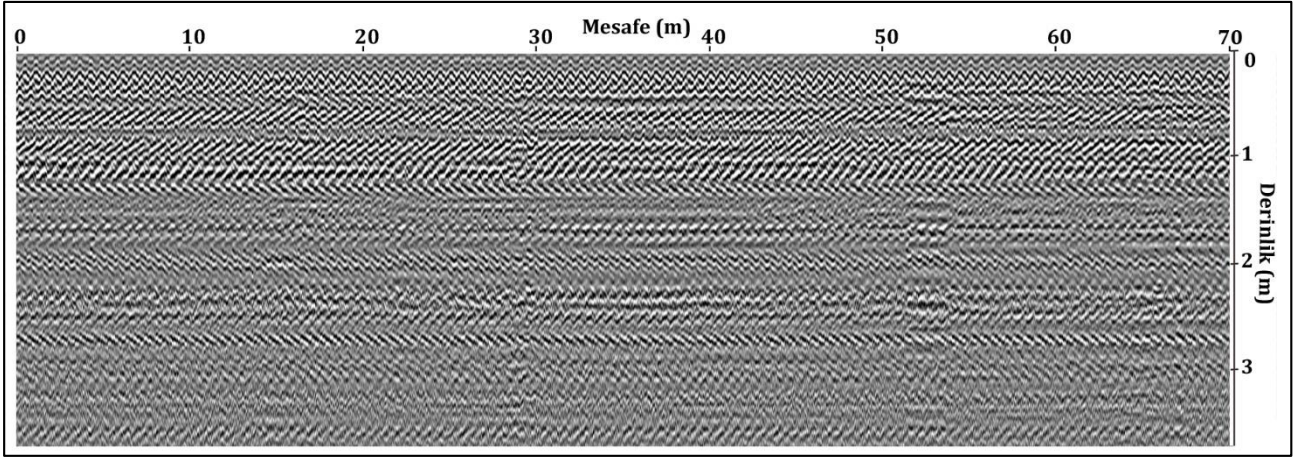
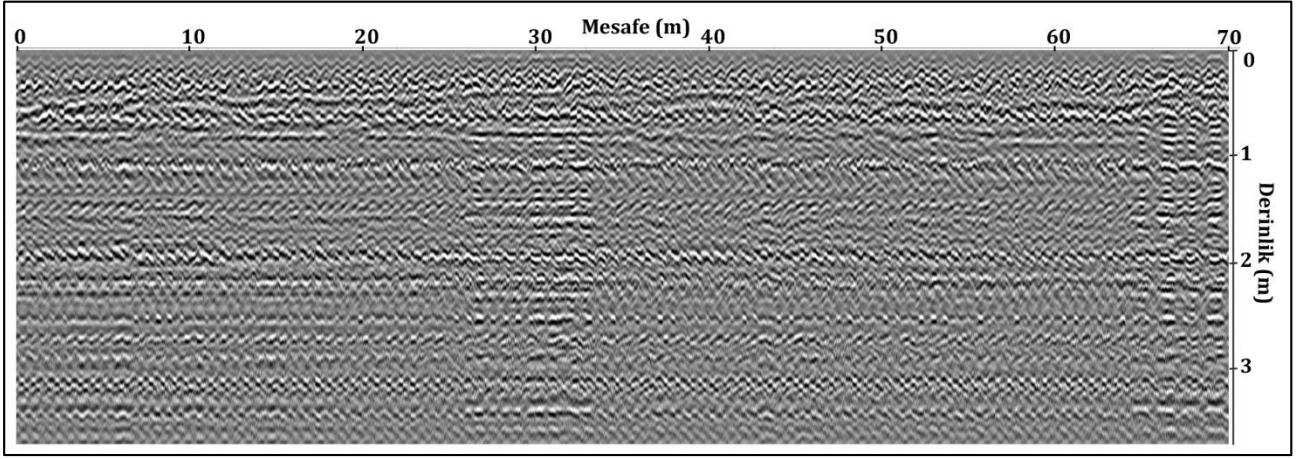
#### 4.2. GPR Sonuçları (GPR Results)

İncelenen eski demiryolu kesiminde balast tabakasının durumunu belirlemek için kirlenme analizi yapılmıştır. Şekil 8'de yenileme çalışmaları sırasında tespit edilen eski demiryolunun kesiti yer almaktadır. Demiryolu kesitinde karakteristik aşırı deformasyondan kaynaklanan balast cebi görülmektedir.



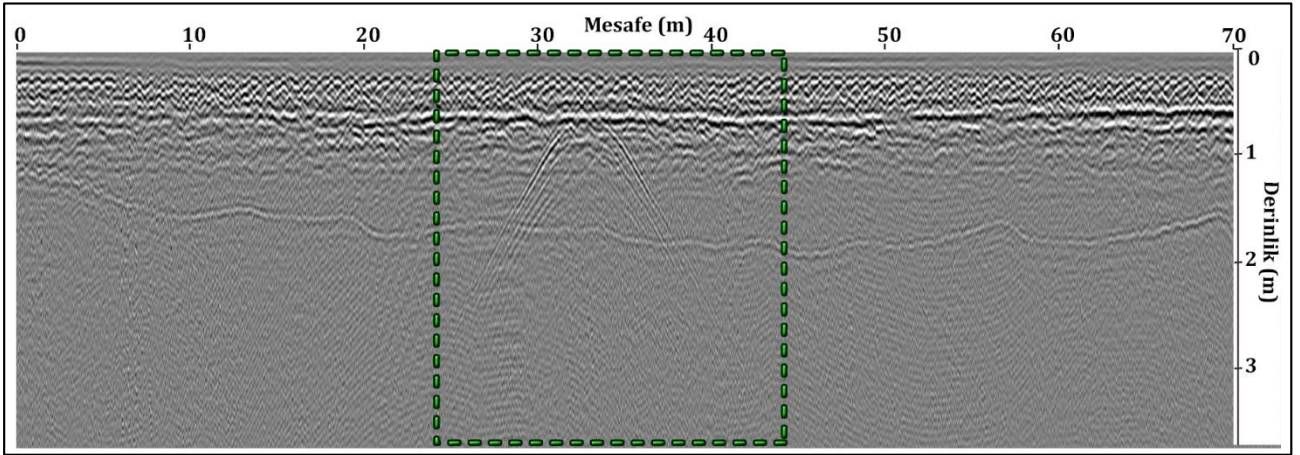
Şekil 8. Eski demiryolu hattı kesitinde balast cebi (Ballast pocket in old railway line cross section)

Radar verilerinin değerlendirilmesinde, radar ile balast tabakası arasındaki hava bölgesinin kesilip atılmasından sonra olası tabaka sınırları işaretlenmiştir. Eski yoldaki ölçümler Şekil 8'de yer alan kesit üzerinden, yeni yolda yapılan ölçümler tasarım ve uygulama kalınlıkları ile karşılaştırılarak kontrol edilmiştir. Yenileme öncesi ve sonrası hattın ortasından yapılan ölçümlerde traverslerin radar sinyallerini yansıtmasından dolayı anlaşılır bir görüntü elde edilememiştir (Şekil 9). Tabaka sınırlarını andıran çizgiler yer almasına rağmen altyapı tabaka kalınlıkları ile tutarlılık gözlenememiştir. Dolayısıyla tabaka sınırı gibi görülen çizgilerin yansımadan kaynaklandığı düşünülmüştür.



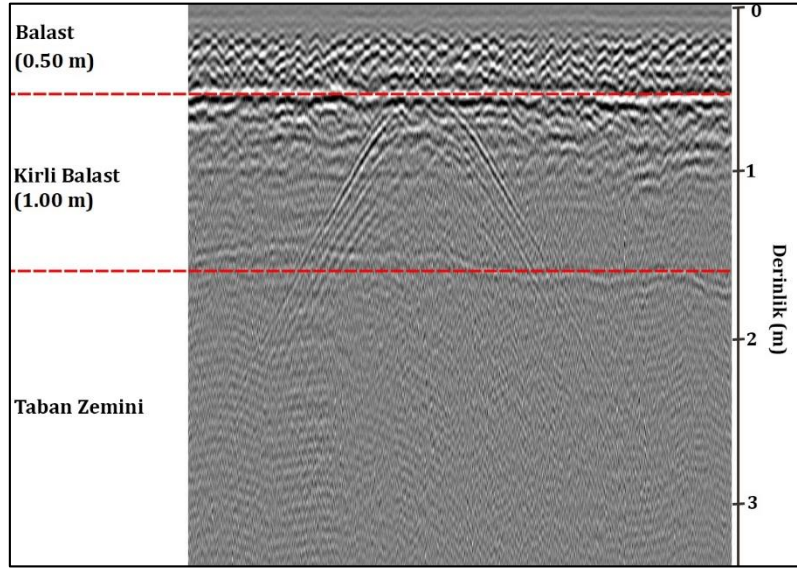
**Şekil 9.** Eski ve yeni yolda hattın ortasından yapılan ölçümlerdeki aşırı yansımalar (Excessive reflections from the center of the line on the old and new railway)

Eski yolda hattın solundan yapılan ölçüm Şekil 10'da yer almaktadır. Yeşil kesikli çizgi ile işaretlenen bölgenin detaylı değerlendirmesi Şekil 11'de gösterilmiştir. Aynı şekilde eski yolda hattın sağından yapılan ölçüm Şekil 12'de, yeşil kesikli çizgilerle işaretlenen bölgenin detaylı değerlendirmesi Şekil 13'te gösterilmiştir.

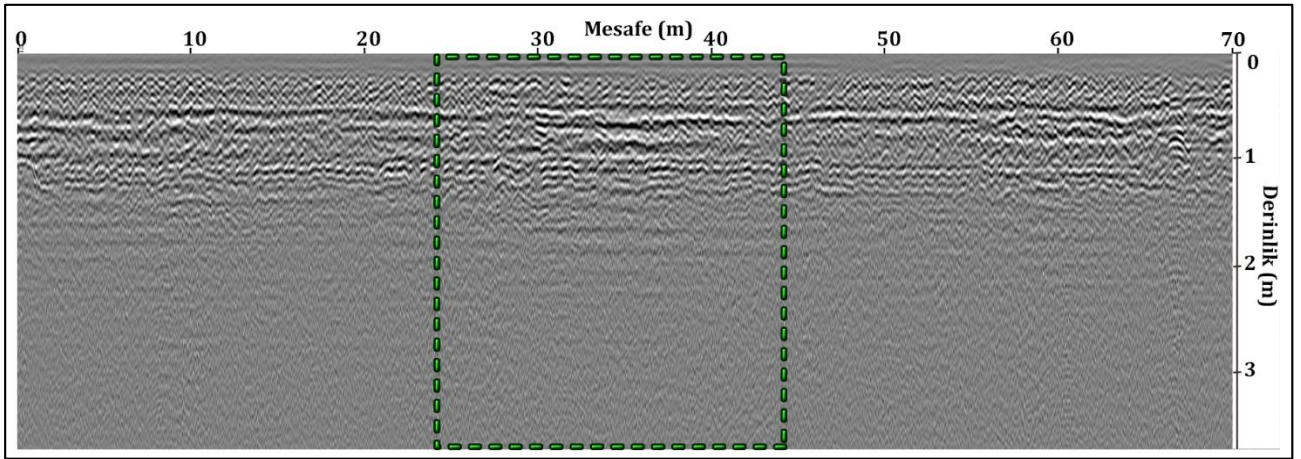


**Şekil 10.** Eski yolda hattın solundan yapılan ölçüm (Measurement from the left of the line on the old railway)

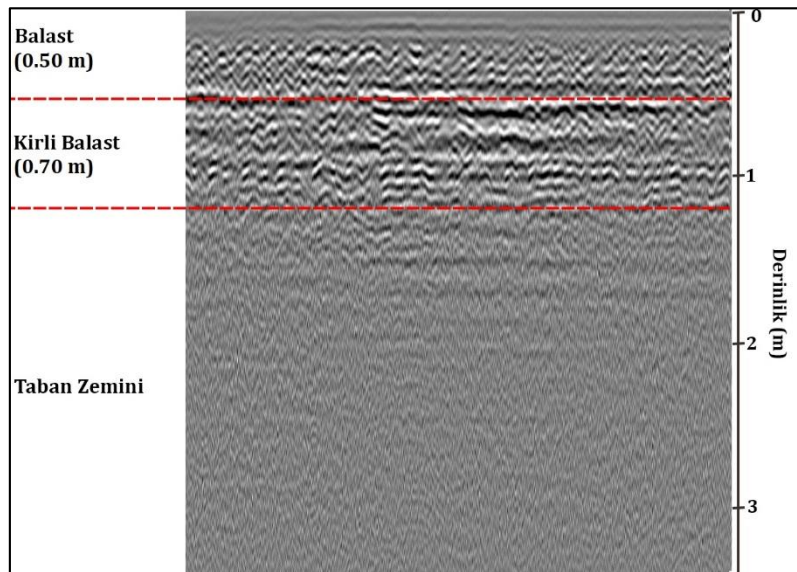
Demiryolu altyapısı 0.3 m balast ve 0.2 m altbalast olmak üzere 0.5 m den oluşmaktadır. Şekil 11'de eski yolda hattın solundan yapılan ölçüm detayında balast tabakası yaklaşık 1.5 m kalınlığa ulaştığı görülmektedir. Benzer şekilde, Şekil 13'te eski yolda hattın sağından yapılan ölçüm detayında balast tabakası yaklaşık 1.2 m kalınlığa ulaştığı görülmektedir. Şekil 8'de yer alan eski demiryolu kesiti incelendiğinde sonuçların radar verileri ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 11. Eski yolda hattın solundan yapılan ölçüm detayı (Measurement detail from the left of the line on the old railway)



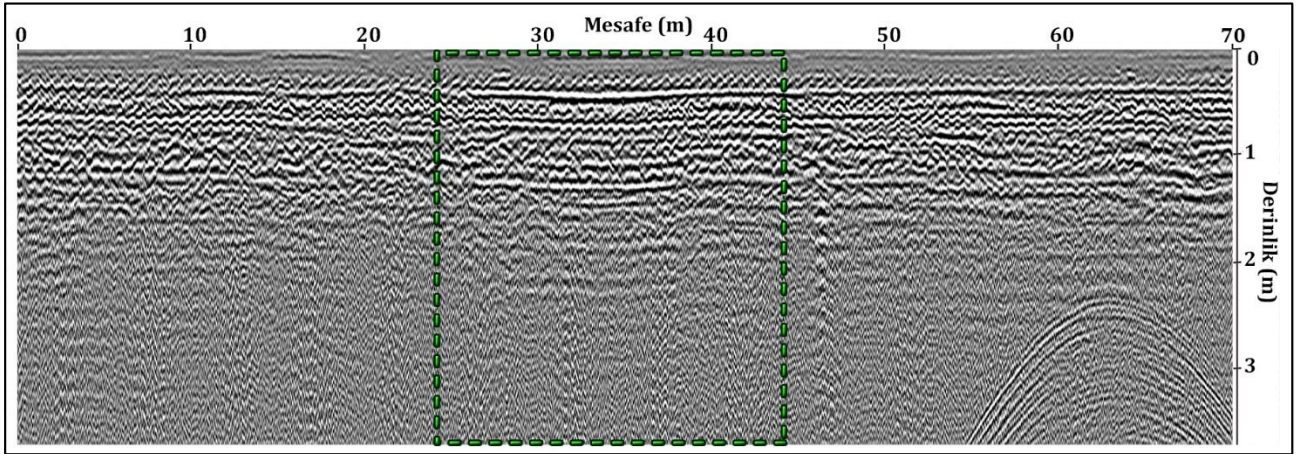
Şekil 12. Eski yolda hattın sağından yapılan ölçüm (Measurement to the right of the line on the old railway)



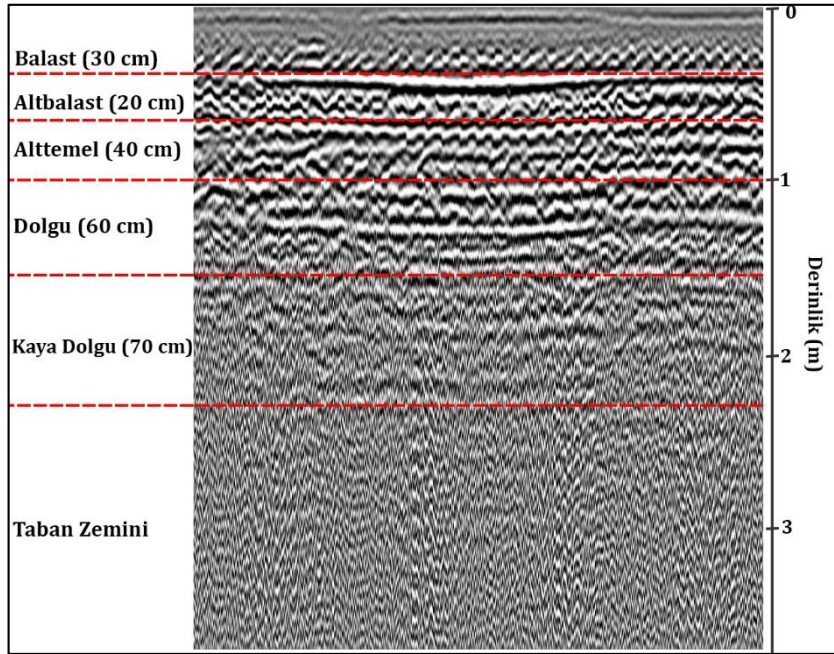
Şekil 13. Eski yolda hattın sağından yapılan ölçüm detayı (Measurement detail to the right of the line on the old railway)

Şekil 11 ve Şekil 13'te yer alan eski yolun solunda ve sağında yapılan ölçümlerin detaylı değerlendirmesi incelendiğinde, yüzeyden itibaren ilk 0.50 m derinliğe kadar nispeten daha temiz balast malzemesi yer almaktadır. Kirlenmeye neden olan ince malzemenin balast boşluklarından aşağıya inmesi sonucunda balast tabakasının alt kısımlarındaki boşlukları doldurmaktadır.

Yeni yolda hattın solundan yapılan ölçüm Şekil 14'te, yeşil kesikli çizgi ile belirtilen bölgenin detaylı değerlendirmesi Şekil 15'de gösterilmiştir.



Şekil 14. Yeni yolda hattın solundan yapılan ölçüm (Measurement on the left of the line on the new railway)



Şekil 15. Yeni yolda hattın solundan yapılan ölçüm detayı (Measurement detail on the left of the line on the new railway)

Yeni yolda yapılan ölçümün detayı (Şekil 15) incelendiğinde birim hacim ağırlıkları birbirinden farklı altyapı elemanları görülmektedir. Sürekli siyah-beyaz çizgiler tabakalar arasındaki ara yüzeyleri temsil etmektedir. Olması gerekenden daha fazla çizgi görülmektedir. Örneğin dolgu tabakası iki tabakadan oluşmuş gibi görünen dolgu tabakası iki aşamada serilip sıkıştırılmış tek bir tabakadır. Radar verilerinde altyapının toplam kalınlığı olan 2.20 m'den daha derinde demiryolu yapısına rastlanmamıştır.

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

İstanbul - Edirne demiryolu hattının Çatalca ilçesindeki yenileme çalışmaları sırasında yürütülen çalışmada demiryolunun eski ve yeni durumu GPR ölçümleri yapılarak belirlenmiştir. Yenileme çalışmalarından önce yapılan ölçüm yolun en kötü durumunu, yenileme çalışmalarından sonra yapılan ölçüm ise yolun en iyi durumunu temsil etmektedir. İncelenen ölçüm kesiminden alınan balast numunesi üzerinde yapılan elek analizleri ile eski balastın kirlenme seviyesi belirlenmiştir.

- Yapılan inceleme sonucunda, yenileme sonrasında yeni yapılan yolun bilinen altyapı tabakalarının kalınlıkları radar ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Ölçümlerden elde edilen tabaka kalınlıklarının altyapı tabaka kalınlıkları ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

- Radar verilerinde yeni yolun daha fazla tabakadan oluştuğu görülmektedir. Bu durumun altyapı tabakalarının tek seferde değil birkaç seferde sıkıştırılmasından kaynaklanan ara yüzeylerden oluştuğu belirlenmiştir.
- Yenileme öncesi eski yolda yapılan radar ölçümlerine bakıldığında aşırı deformasyonlardan kaynaklanan balast tabakasının kalınlığındaki değişimler ve balast cepleri belirlenmiştir.
- Eski hat balast tabakasında kirlenme seviyesi indisi (FI) %28 olarak bulunmuştur.
- Radar ölçümlerinde eski balast tabakasının 2 tabakadan oluştuğu görülmektedir. Eski balast tabakasının deformasyonu sonucunda yolu eski kotuna getirmek için eklenen yeni balastın üstte olması ile ufalanan ve kirlenen balastın alta kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

### **Teşekkür (Acknowledgement)**

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 3165-D1-12 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

### **Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)**

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

### **Kaynaklar (References)**

- Al-Qadi, I., Xie, W., Roberts, R., 2008. Time-Frequency Approach for Ground Penetrating Radar Data Analysis to Assess Railroad Ballast Condition. *Research in Nondestructive Evaluation*, 19:4, 219-237.
- Al-Qadi, I., Xie, W., Roberts, R., 2010. Optimization of Antenna Configuration in Multiple-Frequency Ground Penetrating Radar System for Railroad Substructure Assesment. *NDT&E International*, 43, 20-28.
- Anbazhagan, P., Su, L., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., 2011. Model Track Studies on Fouled Ballast Using Ground Penetrating Radar and Multichannel Analysis of Surface Wave. *Journal of Applied Geophysics*. 74, 175-184.
- Benedetto, F., Tosti, F., Alani, M., 2017. An Entropy-Based Analysis of GPR Data for the Assessment of Railway Ballast Conditions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.55, No.7.
- Danesh, A., Palassi M., Mirghasemi A.A., 2018. Effect of Sand and Clay Fouling on the Shear Strength of Railway Ballast for Different Ballast Gradations. *Granular Matter* (2018) 20: 51.
- Daniels, D.J. (Ed), 2004. *Ground Penetrating Radar – 2nd Edition*. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- Ebrahimi, A., Tinjum, J.M., Edil, T.B., 2014. Deformational Behavior of Fouled Railway Ballast. *Canadian Geotechnical Journal*. 52, 344-355.
- Esmaili, M., Zakeri, J.A., Mosayebi, S.A., 2014. Effect of Sand Fouled Ballast on Train-Induced Vibration. *International Journal of Pavement Engineering* Vol.15, No.7, 635-644.
- Fontul, S., Furtunato, E., De Chiara, F., Burrinha, R., Baldeiras, M., 2016. Railways Track Characterization Using Ground Penetrating Radar, *Procedia engineering*, 143, 1193-1200.
- Huang, H., Tutumluer, E., 2011. Discrete Element Modeling for Fouled Railroad Ballast. *Construction and Building Materials*. 25, 3306-3312.
- Indraratna, B., Ngo, N.T., Rujikiatkamjorn, C., Vinod, J.S., 2014. Behavior of Fresh and Fouled Railway Ballast Subjected to Direct Shear Testing: Discrete Element Simulation. *International Journal of Geomechanics*, 14(1): 34-44.
- Indraratna B., Su, L.J., Rujikiatkamjorn, C., 2011. A New Parameter for Classification and Evaluation of Railway Ballast Fouling. *Canadian Geotechnical Journal* 48, 322-326.
- Kashani, H.F., Ho, C.L., Hyslip, J.P., 2018. Fouling and Water content Influence on the Ballast Deformation Properties. *Construction and Building Materials*. 190, 881-895.
- Li, D., Hyslip, J., Sussmann, T., Chrismer, S., 2016. *Railway Geotechnics*. CRC Press Taylor & Francis Group, 592p, Boca Raton.
- Olhoef, G.R., Selig, E.T., 2002. Ground Penetrating Radar Evaluation of Railway Track Substructure Conditions. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, Proc. SPIE Vol. 4758, pp. 48-53.
- Parsons, R. L., Rahman, A. J., Han, J., & Glavinich, T. E. (2014). Track Ballast Fouling and Permeability Characterization by Using Resistivity. *Transportation Research Record*. 2448 (1), 133-141.
- Selig, E.T., Waters, 1994. *Track Geotechnology and Substructure Management*. Thomas Telford, 446p, London.
- Shao, W., Bouzerdoum, A., Phung, S.L., Su, L., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., 2011. Automatic Classification of Ground-Penetrating-Radar Signals for Railway-Ballast Assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol.49, No. 10.
- Tosti, F., Ciampoli, L.B., Calvi, A., Alani, A.M., Benedetto, A., 2018. An Investigation into the Railway Ballast Dielectric Properties Using Different GPR Antennas and Frequency systems. *NDT and E International* 93, 131-140.
- Yurlov, D., Zarembski, A.M., Okine, N.A., Palese, J.W., Thompson, H., 2019. Probabilistic Approach for Decelopment of Track Geometry Defects as a Function of Ground Penetrating Radar Measurements. *Transportation Infrastructure Geotechnology* 6, 1-20.



## BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORDA EGZOZ ATIK ISI GERİ KAZANIMI İÇİN TERMoeLEKTRİK JENERATÖR MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Ümit TOPALCI<sup>1</sup>, Habib GÜRBÜZ<sup>1\*</sup>, Hüsameddin AKÇAY<sup>1</sup>, Selim DEMİRTÜRK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup> Uşak Üniversitesi, Otomotiv Teknolojisi Programı, Teknik Bilimler Yüksek Okulu, Uşak, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Buji Ateşlemeli Motor,  
Egzoz Atık Isı Geri Kazanımı,  
Termoelektrik Jeneratör,  
Matlab/Simulink Modeli.*

### Öz

Bu çalışmada, buji ateşlemeli bir motorda atık ısı geri kazanımı için kullanılan termoelektrik jeneratörünün (TEJ) Matlab/Simulink programı ile teorik modeli geliştirilmiştir. TEJ modelinin geliştirilmesinde, 1500-4000 rpm aralığında çalışan iki silindirli buji ateşlemeli bir motorun deneysel çalışmalarından elde edilen egzoz gaz sıcaklıkları ve kütle akış hızları kullanılmıştır. TEJ modeli, egzoz ısı eşanjörü ve egzoz eşanjörünün her iki yüzeyine yerleştirilmiş iki motor soğutma suyu eşanjöründen oluşan üç katmanlı bir yapıya sahiptir. Eşanjör malzemesi olarak 3 mm kalınlığında 6063-T6 tipi alüminyum malzeme kullanılmıştır. Termoelektrik modüllerde (TEM) hem n hem de p tipi yarı iletkenler için Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> malzemesi seçilmiştir. Her iki TEJ katmanında 5x4 düzenlemeye sahip toplam 40 adet TEM kullanılmıştır. Matlab/Simulink modelinin sonuçları, önceki çalışmalarda elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Gürbüz ve Akçay, 2015). Sonuç olarak, TEJ'ün Matlab/Simulink modeli ile DC elektrik enerjisi üretimi, 1500-4000 rpm motor devri aralığı için 6,36-50,96 W aralığında değişmiştir. Ayrıca, deneysel ve Matlab/Simulink model sonuçları arasında iyi bir korelasyon ( $R^2= 0,991$ ) olduğu tespit edilmiştir.

## IMPROVEMENT OF THERMOELECTRIC GENERATOR MODEL FOR EXHAUST WASTE HEAT RECOVERY IN A SPARK IGNITION ENGINE

### Keywords

*Spark Ignition Engine,  
Exhaust Waste Heat Recovery,  
Thermoelectric Generator,  
Matlab/Simulink Model.*

### Abstract

In this study, a theoretical model with Matlab/Simulink of thermoelectric generator (TEG) using for waste heat recovery in a spark ignition (SI) engine developed. In the improvement of the TEG model, the exhaust gas temperatures and mass flow rates used which is obtained from the experimental studies of the two-cylinder SI engine operating in the range of 1500-4000 rpm. The TEG model has a three-layer structure, consisting of an exhaust heat exchanger and two engine cooling water exchangers placing on both surfaces of the exhaust exchanger. 3 mm thick 6063-T6 type aluminum material used as heat exchanger material. Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> material selected for both n and p-type semiconductors in thermoelectric modules (TEM). A total of 40 pieces TEM used having 5x4 arrangements on both layers of TEG. The results of the Matlab/Simulink model compared with the experimental results which are obtained at the previous studies (Gürbüz and Akçay, 2015). As a result, the DC electrical power production with the Matlab/Simulink model of the TEG changed in the range of 6.36-50.96 W for the engine speed range of 1500-4000 rpm. Also, a good correlation ( $R^2= 0.991$ ) found between experimental and Matlab/ Simulink model results.

### Alıntı / Cite

Topalci, Ü., Gürbüz, H., Akçay, H., Demirtürk, S., (2020). Buji Ateşlemeli Bir Motorda Egzoz Atık Isı Geri Kazanımı İçin Termoelektrik Jeneratör Modelinin Geliştirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 582-596.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ü. Topalci, 0000-0001-7069-8633  
H. Gürbüz, 0000-0001-5157-6227  
H. Akçay, 0000-0002-5704-670X  
S. Demirtürk, 0000-0001-7861-2427

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	15.03.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	29.05.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	13.06.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: habibgurbuz@sdu.edu.tr, +90-246-211-1867

## 1. Giriş (Introduction)

İçten yanmalı motorlar (İYM)'da silindir içine alınan yakıtın ısı enerjisinin  $\approx 25-35$ 'i çıkış milinde mekanik enerjiye dönüştürülürken  $\approx 30$ 'u soğutma kayıpları ve  $\approx 40$ 'ı egzoz gazları ile birlikte atık ısı enerjisi olarak atmosfere atılmaktadır. İYM'larda çevreye atılan atık ısı enerjisinin çeşitli yöntemler ile elektrik enerjisine dönüştürülerek yakıt ekonomisinin iyileştirilmesi ve genel sistem verimliliğinin artırılması mümkündür (Karri, 2011). Son zamanlarda, atık ısı enerjisinden elektrik enerjisinin üretildiği TEJ sistemleri, çevresel kaygılar ve küresel ısınma nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları içinde dikkat çeken bir sistem haline gelmiştir (Chen vd., 2008; Taymaz vd., 2003). TEJ sistemleri, atık ısı geri kazanımı için İYM'lar, şofbenler, kalorifer kazanları ve jeotermal sistemler gibi birçok alanda kullanılarak enerji verimliliğini artırmaktadır (Ikoma vd., 1998; Dziurdzia ve Mirocha, 2009; Chen vd., 2009). İYM'ların egzoz atık ısı enerjisinin, elektrik enerjisine dönüştürüldüğü TEJ sistemlerinde yarı iletken malzemelerden oluşan termoelektrik modüllerin (TEM) kullanımı yaygınlaşmaktadır. TEJ'ler kullanılarak İYM'un egzoz gazı ve soğutucu akışkan sıcaklığı arasındaki  $\Delta T$  sıcaklık farkını kullanan TEM yardımıyla elektrik enerjisi üretilebilmektedir (Dalola vd., 2009; Khattab ve El, 2006). Ancak, TEJ'lerin yüksek maliyetleri ve dönüşüm verimlerinin düşük olması, uygulamada yaygın kullanımlarını sınırlamaktadır. TEJ'lerde egzoz atık ısı enerjisi kullanılarak elektrik enerjisinin üretiminde dönüşüm verimi  $\approx 5-10$  aralığındadır (Kunt and Güneş, 2017). Diğer dönüşüm sistemlerine göre TEJ'lerin dönüşüm verimi çok düşük olarak görülse de elektrik üretiminde atık ısı enerjisinin kullanılması nedeniyle TEJ'ler avantajlı bir yapıya sahiptir (Lertsatitthanakorn, 2007). TEJ sistemleri kullanılarak İYM'ların egzoz atık ısı enerjiden üretilen elektrik enerjisi, araç üzerindeki donanımların elektrik ihtiyacını karşılamak ve/veya aracın şarj sistemine ilave olarak kullanılabilir. Bu durum, dolaylı olarak yakıt tüketiminin ve egzoz emisyonlarının azalmasına yardımcı olmaktadır (Kunt, 2016). Günümüzde, geliştirilen TEJ sistemlerinde yer alan termo-elementler için uygun malzeme seçimi ve uygun geometride eşanjör tasarımı TEJ sistemlerinin elektriksel çıkış gücünü önemli ölçüde iyileştirerek sistemin dönüşüm verimine olumlu yönde katkı sağlamaktadır. Bu amaçla, araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen termo-elementleri oluşturan malzeme türleri ve eşanjör tasarımı üzerine yoğunlaşmaktadır (Derun, 2005). Bir termoelektrik ünite, birbirinden farklı iki yarı iletken malzemenin (n-tipi ve p-tipi), birbirine seri olarak birleştirilmesi ile oluşturulan devrede, bileşenlerin farklı sıcaklıklara maruz bırakılması ile DC elektrik gerilimi oluşturmaktadır. Bu gerilime "seebeck voltajı" denir. TEM'in çıkış terminalinden ölçülen gerilim değeri, malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır. Elde edilen  $\Delta T$  sıcaklık farkı ile p-tipi yarı iletken pozitif, n-tipi yarı iletken negatif polarite oluşmaktadır (Rowe ve Bhandari, 1983; Yavuz, vd., 2010; Doğdu, 2013; Güneş ve Hançer, 2017). Termoelektrik malzemelerin performansını değerlendirmek amacı ile kullanılan ZT (Figure of Merit) değeri, metrik sisteme göre önemli bir termoelektrik özellik olup termoelektrik malzemenin elektriksel ve termal malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı etkinliğini karakterize eder (Freedman, 2011). 1950'lerden bu yana ZT değerlerini iyileştirmek için sürekli çaba gösterilmektedir. Ancak,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  esaslı ticari termoelektrik malzemelerinin maksimum ZT değeri ortam sıcaklığında 0,6'dan 1'e yükseltilebilmiştir (Dresselhaus et.al, 2007).

Temizer vd. (2016), bir dizel motor için geliştirdikleri sekizgen geometriye sahip alüminyum TEJ ile deneysel ve teorik çalışmalar yürütmüşlerdir. TEJ modelini ANSYS/Fluent modülünde modelleyerek akış hareketlerini, daralma ve genişleme katsayılarının değişimini ve yüzey alanlarının etkisini sayısal analiz etmişlerdir. Çalışmada, TEJ'de daralma ve genişleme katsayılarının önemli bir etkiye sahip olduğunu, egzoz gazlarının geçtiği eşanjörde geniş akış alanının motora geri basınç oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Sekizgen prizma yapısına sahip eşanjör yüzeylerine yerleştirilen toplam 40 adet termoelektrik modül ile, motorun 3500 d/d ve 100 Nm çıkış mili yükü altında maksimum 0,1567 kW DC elektrik gücü üretmişlerdir. Hsu vd. (2011), tasarladıkları 3 katmanlı TEJ yapısında 24 adet TEM kullanarak deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Aracın egzoz hattının ortasına yerleştirdikleri TEJ ile motorun 3500 d/d devri ve  $\Delta T=30$  K sıcaklık farkında 12,41 W maksimum çıkış gücü elde etmişler. Fakat elde edilen maksimum TEJ çıkış gücü ile sistem veriminin %0,3 gibi düşük bir değerde olduğunu tespit etmişlerdir. Yu vd. (2015), TEJ sistemine sahip bir aracın ivmelenme, yokuş tırmanma gibi sabit ve dinamik sürüş koşulları için deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Çalışmalarında, araç hızının atık ısı geri kazanımı için TEJ performansını etkileyen önemli bir faktör olduğunu, yüksek araç hızlarında TEJ performansının arttığını, 20 km/h araç hızında TEJ güç çıkışı 18 W iken 120 km/h araç hızında 220 W'a ulaştığını tespit etmişlerdir. Gürbüz ve Akçay (2015), LPG ile çalışan buji ateşlemeli motorda atık ısı geri kazanımı için bir TEJ modeli geliştirmişlerdir. TEJ modelinde, orta egzoz eşanjörünün her iki yüzeyi için kullanılan 2 adet motor soğutma suyu (MSS) eşanjörleri ve MSS eşanjörlerinin üzerine yerleştirilen 2 adet LPG eşanjörleri ile 5 katmanlı bir TEJ yapısı oluşturmuşlardır. Geliştirdikleri 5 katmanlı TEJ yapısı ile 3 katmanlı TEJ yapısına göre %17,9 daha yüksek çıkış gücü elde etmişlerdir. 5 katmanlı TEJ yapısını kullanarak motorun 4000 d/d devri  $\Delta T= 148,3$  °C sıcaklık farkı altında 63,18 W TEJ çıkış gücü üretmişlerdir.

Bu çalışmada, 250 W DC elektrik gücü elde etmek amacıyla TEJ'ün orta egzoz eşanjörü ile MSS eşanjörleri arasında toplam  $2 \times 20 = 40$  adet TEM kullanılarak Matlab/Simulink programında teorik bir model oluşturulmuştur. Geliştirilen teorik TEJ modeli, biri orta egzoz eşanjörü ve egzoz eşanjörünün her iki yüzeyine yerleştirilen MSS



eşanjörleri ile 3 katmanlı ve ters akışlı olarak tasarlanmıştır. Teorik modelde, Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından iki silindirik, buji ateşlemeli bir motorun  $\frac{1}{2}$  gaz keleşi açıklık oranı ve 1500-4000 d/d devir aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda tespit edilen TEJ girişindeki egzoz gazı sıcaklığı ve debisinin yanında MSS sıcaklık ve debi değeri kullanılmıştır. Teorik model sonuçları Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ve TEG1-1263-4.3 marka ticari ürünün katalog değeri ile karşılaştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Çalışmada, ticari olarak kullanılan ve piyasadan temin edilen TEG1-1263-4.3 marka TEM'ün ana boyut ölçüleri, sıcak ve soğuk yüzey çalışma aralığı (sıcaklık) ve elektriksel çıkış değeri (akım, voltaj, güç) dikkate alınarak hedef seçilen 250 W DC elektrik üretimi gerçekleştirilecek şekilde boyutlandırılan TEJ için Matlab/Simulink programında teorik bir modeli geliştirilmiştir. Teorik modelde kullanılan TEM modülünün teknik özellikleri Tablo 1'de, 2 silindirik motordan Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından elde edilen deneysel sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 1.** TEG1-1263-4.3'ün teknik özellikleri (Technical specification of TEG1-1263-4.3) (Tecteg, 2017)

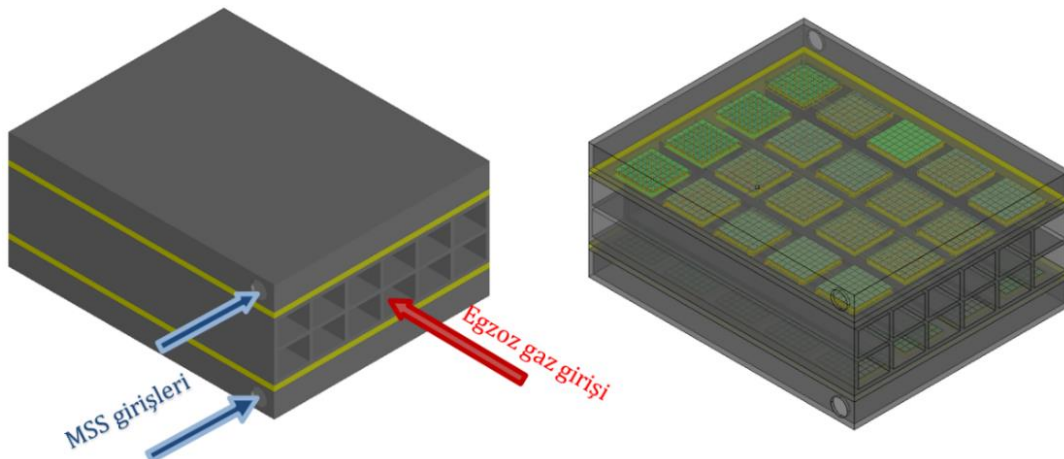
Boyutlar (mm)	30x30x4,1
Maksimum sıcak taraf sıcaklığı (°C)	300
Minimum soğuk taraf sıcaklığı (°C)	30
Açık devre voltajı (V)	10,7
Yük direnci (ohm)	5,4
Yük gerilimi (V)	5,3
Yük akımı (A)	1,0
Yük altındaki güç (W)	5,2

**Tablo 2.** Teorik TEJ modelinde kullanılan deneysel sonuçlar (Experimental results used in the theoretical TEG model) (Akçay, 2015)

Motor devri (d/d)	Egzoz gazı TEJ giriş sıcaklığı (°C)	Egzoz gazı TEJ giriş debisi (kg/s)	Soğutma suyu TEJ giriş sıcaklığı (°C)	Soğutma suyu TEJ giriş debisi (kg/s)
1500	180	0,00427	68,3	0,012
2000	202	0,00531	69,5	0,019
2500	225	0,00624	70,5	0,024
3000	263	0,00713	71,3	0,028
3500	301	0,00811	72,4	0,032
4000	326	0,00891	73,9	0,035

### 2.1. Eşanjör Ana Boyutlarının Belirlenmesi (Determination of Heat Exchanger Main Dimensions)

3 katmanlı ve ters akışlı olarak tasarlanan TEJ modelinin katı model resmi Şekil 1'de verilmiştir. Orta egzoz eşanjörü iç hacmi, her bir termoelektrik katmana homojen bir şekilde sıcaklık dağılımının gerçekleştirilebilmesi için iki eşit parçaya bölünmüştür. Egzoz eşanjörünün her bir iç hacmi ise, eşanjör akış düzlemi boyunca kanatçıklar yardımıyla 6 eşit parçaya bölünerek egzoz eşanjörü toplam 12 eşit hacimden oluşacak şekilde bölümlendirilmiştir.

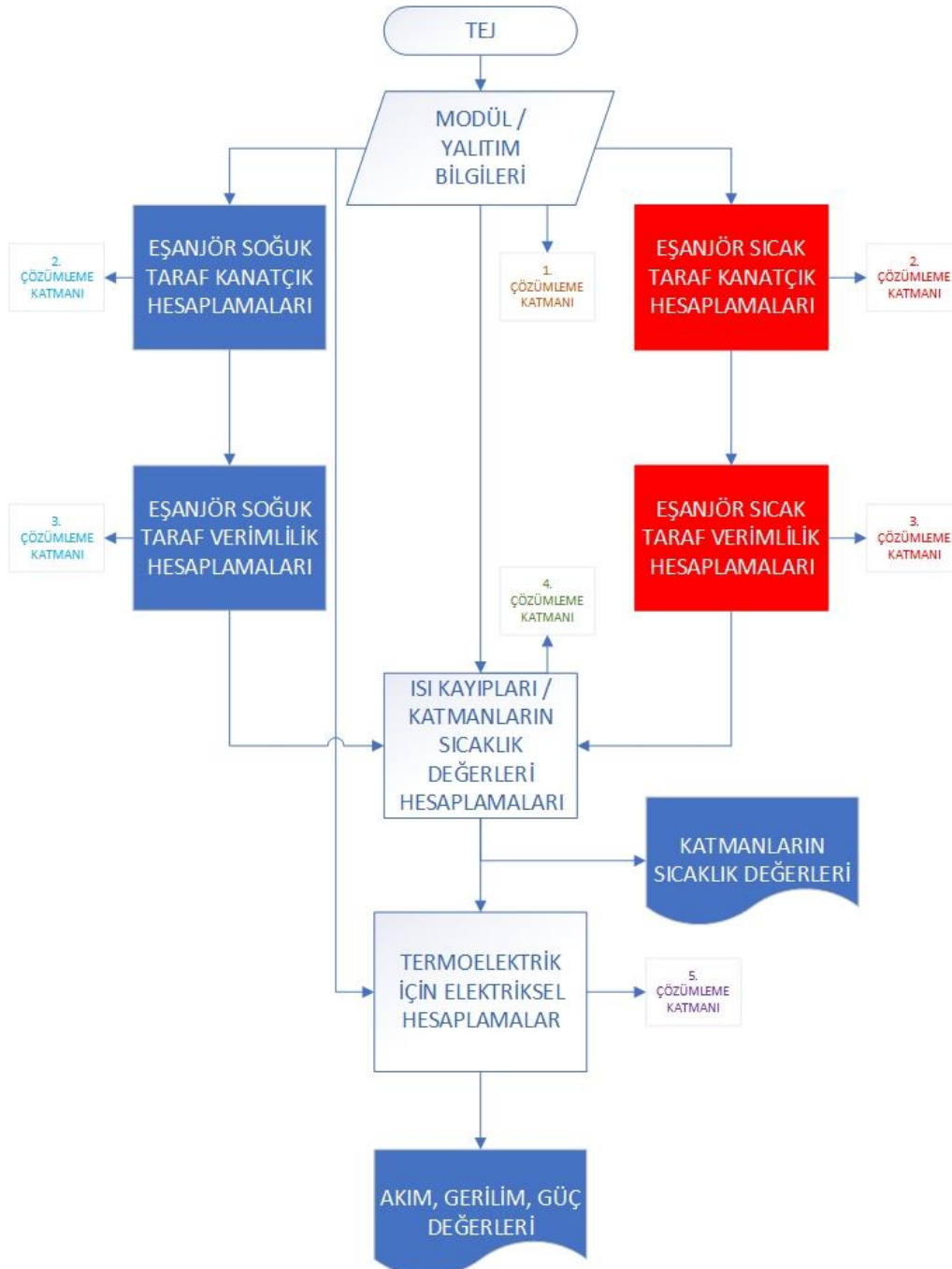


**Şekil 1.** Teorik TEJ modeline ait katı model resimler (Solid model pictures of the theoretical TEG model)

TEJ'de orta egzoz eşanjörü ile her bir MSS eşanjörü arasında yerleştirilecek  $4 \times 5 = 20$  adet TEM'den oluşan 2 adet termoelektrik katman oluşturulmuş ve toplam 40 adet TEM'in kullanılacağı tasarım gerçekleştirilmiştir. Katmanlarda her iki TEM'ün kenar yüzeyleri arasında 10 mm boşluk bırakılarak egzoz ve MSS eşanjörleri için toplam yüzey alanı belirlenmiştir. Belirlenen TEM sayısı ve geometrik olarak yapılan düzenleme doğrultusunda  $190 \times 160$  mm ana boyutları ile  $30400 \text{ mm}^2$  eşanjör iç yüzey alanı belirlenmiştir. Egzoz ve MSS eşanjörleri için deneysel çalışmalarda kullanılan buji ateşlemeli motorun maksimum egzoz gazı çıkış debisi ve MSS debisi dikkate alınarak sırasıyla 40 mm ve 20 mm eşanjör yüksekliği belirlenmiştir. Egzoz eşanjörünün 3 mm, MSS eşanjörünün ise 2 mm kalınlığında 6063-T6 tipi alüminyum sac malzemeden üretilmesi planlanarak toplam TEJ yüksekliği belirlenmiştir.

## 2.2. TEJ'ün Matlab/Simulink Modelinin Geliştirilmesi (Development of Matlab/Simulink Model of TEG)

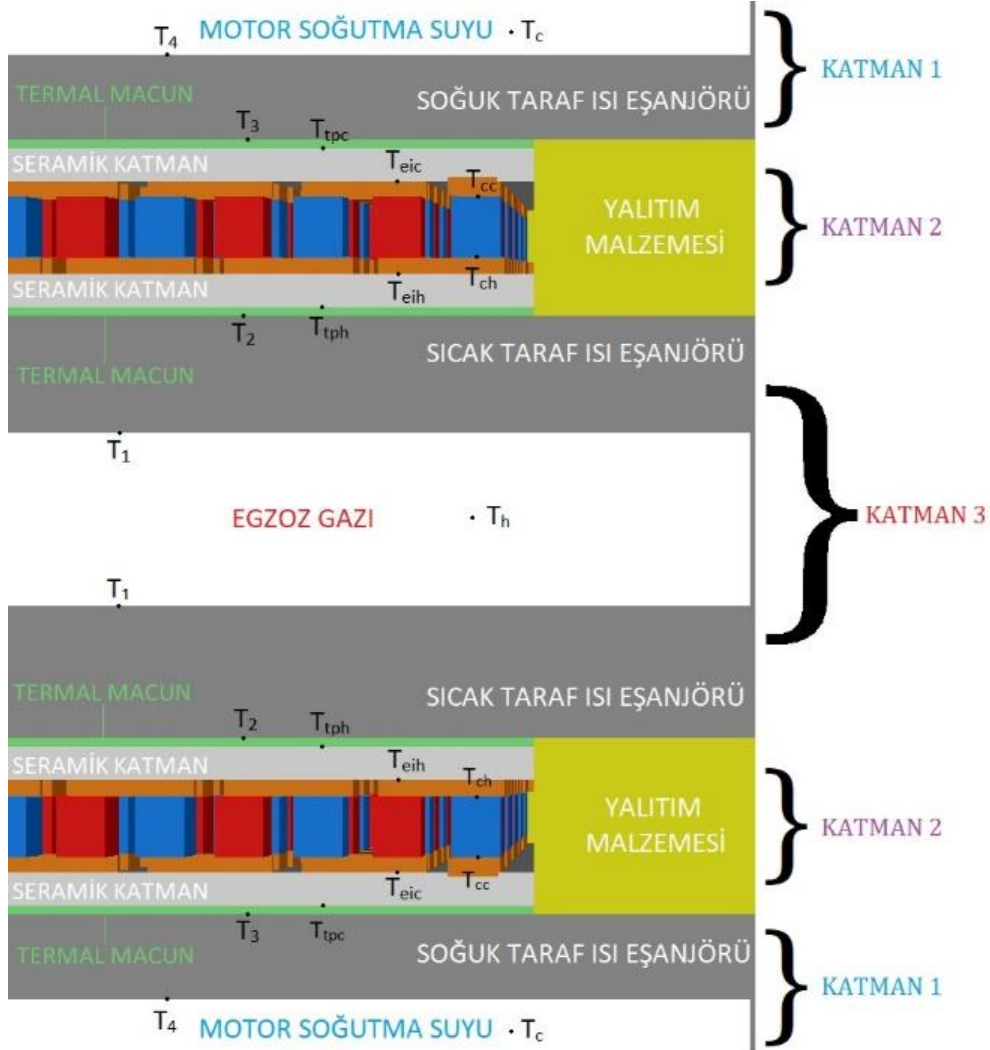
TEJ'ün Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik modeli; Modül ve yalıtım hesaplamaları, kanatçık hesaplamaları, eşanjör verimlilik hesaplamaları, ısı kayıpları ve katmanların sıcaklık değerlerinin hesaplanması ve termoelektrik modüllerde elektriksel hesaplamalar olmak üzere 5 çözümleme katmandan oluşmaktadır. Bu çözümleme katmanlarından oluşan teorik TEJ modelin akış diyagramı Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. TEJ'ün Matlab/Simulink modeline ait akış diyagramı (Flow chart by Matlab/Simulink model of TEG)

### 2.2.1. Modül ve Yalıtım Hesaplamaları (Calculations of Module and Insulation)

Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik TEJ modelinde orta egzoz eşanjörü ile MSS eşanjörleri arasındaki toplam ısı transferi miktarı, kullanılan her bir elemanın ısı iletim katsayıları dikkate alınarak kademelendirilmiştir. Her bir ısı transferi kademesi için denklemlerde kullanılan sıcaklık noktaları ve tanımlamaları Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Matlab/Simulink modelinde kullanılan TEJ'nin katmanları ve sıcaklık tanımlamaları (Layers and temperature definitions of TEG used in Matlab/Simulink model)

Topalci (2017) tarafından geliştirilen teorik model referans alınarak TEJ'nin modellenmesi için kullanılan formüller yardımıyla sayısal hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan eşitlikler literatürde benzer çalışmalarda konu edilmiştir (Kunt and Güneş, 2017). Modül ve yalıtım hesaplamaları katmanında, modüllerin toplam genişliği ( $w_{mod}$ ), sistemde paralel olarak yerleştirilen TEM adeti ( $N_{mod,p}$ ), sistemde seri olarak yerleştirilen TEM adeti ( $N_{mod,s}$ ) ve yalıtımda kullanılacak malzemenin genişlik ( $w_{ins}$ ) verileri girdi olarak kullanılmaktadır. TEM'lerin toplam genişliği ( $W_{mod,z}$ ) ve uzunluğu ( $L_{mod,z}$ );

$$W_{mod,z} = w_{mod} * N_{mod,p} \text{ ve } L_{mod,z} = w_{mod} * N_{mod,s} \quad (1)$$

Modüllerin yerleştirileceği toplam yüzey alanı ( $A_{mod,z}$ );

$$A_{mod,z} = L_{mod,z} * W_{mod,z} \quad (2)$$

Yalıtım bölgesinin alanı ( $A_{ins}$ ) ve eşanjör sistemi yüzey alanı ( $A_z$ );

$$A_{ins} = [w_{ins} * W_{mod,z} * (N_{mod,s} + 1)] + [w_{ins} * (N_{mod,p} + 1)] * [w_{ins} * (N_{mod,s} + 1) + L_{mod,z}] \text{ ve } A_z = A_{ins} + A_{mod,z} \quad (3)$$

Modüllerin toplam uzunluğunun toplam genişliğine oranı ( $\beta_{lw}$ );

$$\beta_{lw} = \frac{L_{mod,z}}{w_{mod,z}} \quad (4)$$

Toplam termoelektrik eşanjör uzunluğu ( $L_z$ ) ve genişliği ( $W_z$ );

$$L_z = \sqrt{A_z * \beta_{lw}} \text{ ve } W_z = \sqrt{\frac{A_z}{\beta_{lw}}} \quad (5)$$

Nihai eşanjör boyutu ( $A_{he}$ );

$$A_{he} = L_z * W_z \quad (6)$$

### 2.2.2. Kanatçık Hesaplamaları (Calculations of Fins)

Kanatçık hesaplamaları katmanında, eşanjör içerisindeki kanal adeti ( $N_f$ ) ve kanatçık kalınlığı ( $T_f$ ) değerleri girdi olarak kullanılarak eşanjörün içerisindeki kanatçık sayısı ( $N_{ch}$ );

$$N_{ch} = N_f - 1 \quad (7)$$

Kanatçık aralığı ( $P_f$ );

$$P_f = \frac{W_z - T_f}{N_{ch}} \quad (8)$$

Kanatçıklar arası boşluk ( $S_f$ );

$$S_f = P_f - T_f \quad (9)$$

Kanatçıklar tarafından oluşturulan bir kanalın çevresi ( $P_{wet}$ );

$$P_{wet} = 2L_f + 2S_f \quad (10)$$

Akış hareketi olan kanalın yapay çapı ( $D_h$ );

$$D_h = \frac{4 * L_f * S_f}{P_{wet}} \quad (11)$$

Kanalların oluşturduğu toplam giriş alanı ( $A_{ent}$ );

$$A_{ent} = S_f * L_f * N_{ch} \quad (12)$$

Herhangi bir kanatçığın karakteristik uzunluk değeri ( $L_{f,ch}$ );

$$L_{f,ch} = L_f + \frac{T_f}{2} \quad (13)$$

Herhangi bir kanatçığın çevresi ( $P_{face}$ );

$$P_{face} = 2T_f + 2L_z \quad (14)$$

Kanatçığın kesit alanı ( $A_c$ );

$$A_c = T_f * L_z \quad (15)$$

Tüm kanatçıkların toplam yüzey alanı ( $A_{f,surf}$ );

$$A_{f,surf} = 2 * N_{ch} * L_{f,ch} * L_z \quad (16)$$

Tabanın toplam alanı ( $A_{b,surf}$ );

$$A_{b,surf} = A_{zone} - (A_c * N_f) \quad (17)$$

Toplam etkin yüzey alanı ( $A_{tot,surf}$ );

$$A_{tot,surf} = A_{f,surf} + A_{b,surf} \quad (18)$$

### 2.2.3. Eşanjörlerin Verimlilik Hesaplamaları (Efficiency Calculations of Heat Exchangers)

Eşanjör verimlilik hesaplamaları katmanında, egzoz gazı ve MSS'nun debisi  $\dot{m}$ , egzoz gazı ve MSS'nun dinamik viskozitesi  $\mu$ , eşanjör malzeme geometrisine bağlı sürtünme katsayısı ( $C$ ), Prandtl sayısı ( $Pr$ ), sıcak (egzoz eşanjörü) ve soğuk taraf (MSS eşanjörü) ısı iletim katsayısı ( $K$ ) ve kanatçıkta kullanılan malzemenin ısı iletim ( $K_{fin}$ ) katsayı değerleri girdi olarak kullanılır ve kanatçık sisteminin Reynold sayısı ( $Re$ );

$$Re = \frac{4 * \dot{m}}{\mu * P_{wet} * N_{ch}} \quad (19)$$

Nusselt sayısı ( $Nu$ );

$$Nu = C * Re^{1/2} * Pr^{1/3} \quad (20)$$

Sıcak ve soğuk taraf ısı taşınım katsayısı ( $h$ );

$$h = (Nu * K) / D_h \quad (21)$$

$$m = \sqrt{(h * P_{face}) / (K_{fin} * A_c)} \quad (22)$$

Tek bir kanatçığın verimliliği ( $\eta_f$ );

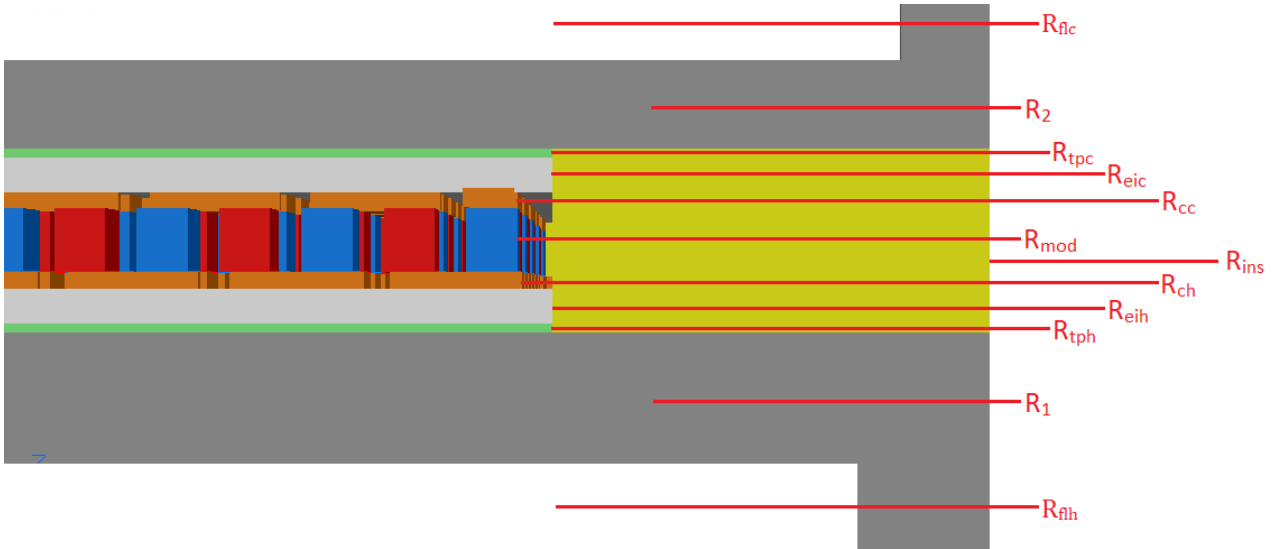
$$\eta_f = \frac{\tanh(m \cdot L_{f,ch})}{m \cdot L_{f,ch}} \quad (23)$$

Toplam kanatçık verimliliği ( $\eta_o$ );

$$\eta_o = 1 - \left[ \frac{A_{f,surf}}{A_{tot,surf}} (1 - \eta_f) \right] \quad (24)$$

#### 2.2.4. Isı Kayıpları ve Eşanjör Katmanlarının Sıcaklık Değerlerinin Hesaplanması (Calculation of Heat Losses and Heat Values of Heat Exchanger Layers)

Isı kayıpları ve “eşanjör katmanlarının sıcaklık değerlerinin hesaplanması katmanında”, sıcak ve soğuk taraf için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Matlab/Simulink modelinde kullanılan TEJ’ün katmanlarına ait direnç tanımlamaları Şekil 4’de verilmektedir.



Şekil 4. Matlab/Simulink modelinde kullanılan TEJ’ün katmanlarına ait direnç tanımlamaları (Resistance definitions for the layers of TEJ used in Matlab / Simulink model)

Egzoz gazı ve MSS akışkanlarının ısı direnci ( $R_{flx}$ );

$$R_{flx} = \frac{1}{\eta_o \cdot h \cdot A_{tot,surf}} \quad (25)$$

Diğer ısı dirençler ( $R_{xx}$ ), malzeme kalınlıkları ( $L_{xx}$ ), malzeme ısı iletkenlikleri ( $K_{xx}$ ) ve malzeme kesit alanları ( $A_{xx}$ ) değerleri; eşanjör malzemesi ısı direnci ( $R_{mh}$ ), kalınlığı ( $L_{mh}$ ), kesit alanı ( $A_z$ ), termal macun direnci ( $R_{tp}$ ), kalınlığı ( $L_{tp}$ ) ve kesit alanı ( $A_{mod}$ ), seramik direnci ( $R_{ei}$ ), seramik kalınlığı ( $L_{ei}$ ) ve kesit alanı ( $A_{mod}$ ), yalıtım malzemesi direnci ( $R_{ins}$ ), kalınlığı ( $L_{ins}$ ) ve kesit alanı ( $A_{ins}$ ), için kademe kademe Eşitlik 26-27’deki denklemler ile hesaplanmıştır.

$$R_{xx} = \frac{L_{xx}}{K_{xx} \cdot A_{xx}} \quad (26)$$

Bakır iletkenin ısı direnci ( $R_{cp}$ );

$$R_{cp} = \frac{L_{cp}}{K_{cp} \cdot A_{cp} \cdot n_{pn}} \quad (27)$$

Bakır iletken kalınlığı ( $L_{cp}$ ), bakır iletken ısı iletkenliği ( $K_{cp}$ ), bakır iletken kesit alanı ( $A_{cp}$ ), tek bir modüldeki p-n çifti sayısı ( $n_{pn}$ ), p-n modüllerinin ısı direnci ( $R_{mod}$ ) kalınlıkları ( $L_{pn}$ ), ısı iletkenlikleri ( $K_{mod}$ ) ve kesit alanları ( $A_{pn}$ ) değerleri;

$$R_{mod} = \frac{L_{pn}}{K_{mod} * A_{pn} * n_{pn}} \quad (28)$$

TEM'ün toplam ısı direnci ( $R_{mix}$ );

$$R_{mix} = 2 * (R_{tp} + R_{ei} + R_{cp}) + R_{mod} \quad (29)$$

TEM ve yalıtım alanının toplam ısı direnci ( $R_{tot}$ );

$$R_{tot} = \{[(N_{mod,s} * N_{mod,p})/R_{mix}] + [((N_{mod,s} + 1)(N_{mod,p} + 1))/R_{ins}]\}^{-1} \quad (30)$$

TEJ'ün toplam ısı direnci ( $R_{tej}$ );

$$R_{tej} = R_{flh} + R_{flc} + 2 * R_{ex/mss} + R_{tot} \quad (31)$$

Kanatçık yapısı ve malzeme tipine bağlı verimlilik sonucu oluşan sıcaklık farkı ( $\Delta T_{\eta}$ );

$$\Delta T_{\eta} = T_{ex} * \eta_o - T_{mss} * \eta_o \quad (32)$$

Burada,  $T_{ex}$  egzoz gaz sıcaklığı,  $T_{mss}$  MSS sıcaklığıdır. TEJ sisteminin ısı transfer hızı ( $Q$ );

$$Q = \frac{\Delta T_{\eta}}{R_{tej}} \quad (33)$$

Kanatçık yapısı ve malzeme tipine bağlı verimlilik sonucu oluşan akışkanların sıcaklık değeri ( $T_{fl}$ );

$$T_{fl} = T_{ex/mss} * \eta_o \quad (34)$$

Sıcak ve soğuk taraf eşanjör sıcaklık değerleri  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$  ve ısı direnç değerleri  $R_{zz}$ ; iç yüzeyi sıcaklığı ( $T_{he}$ ), termal macun temas noktası ( $T_{hes}$ ), seramik katman temas noktası ( $T_{tp}$ ), bakır katman temas noktası ( $T_{ei}$ ) ve p-n bacakları temas noktası ( $T_{cpex}/T_{cpmss}$ ) için kademe kademe aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$T_{xx} = T_{yy} - Q * R_{zz} \quad (35)$$

p-n bacaklarına düşen sıcaklık farkı ise;

$$\Delta T_{te} = T_{cpex} - T_{cpmss} \quad (36)$$

### 2.2.5. Termoelektrik Modüllerde Elektriksel Hesaplamalar (Electrical Calculations in Thermoelectric Modules)

Termoelektrik modüllerde elektriksel hesaplamalar katmanında, TEJ elektrik sistemine ait TEJ'ün Seebeck katsayısı ( $\alpha_{tej}$ ), TEJ'ün iç direnci ( $r_{tej}$ ), TEJ'ün açık devre gerilimi ( $V_{oc,tej}$ );

$$V_{oc,tej} = \alpha_{tej} * \Delta T_{te} \quad (37)$$

TEJ'ün yük altındaki akımı ( $I_L$ );

$$I_L = \frac{V_{oc,tej}}{r_{tej} + R_L} \quad (38)$$

Burada  $R_L$  kullanıcı tanımlı yük direncidir. TEJ'ün yük altındaki çıkış gerilimi ( $V_L$ );

$$V_L = I_L * R_L \quad (39)$$

TEJ'ün yük altındaki çıkış gücü ( $P_L$ );

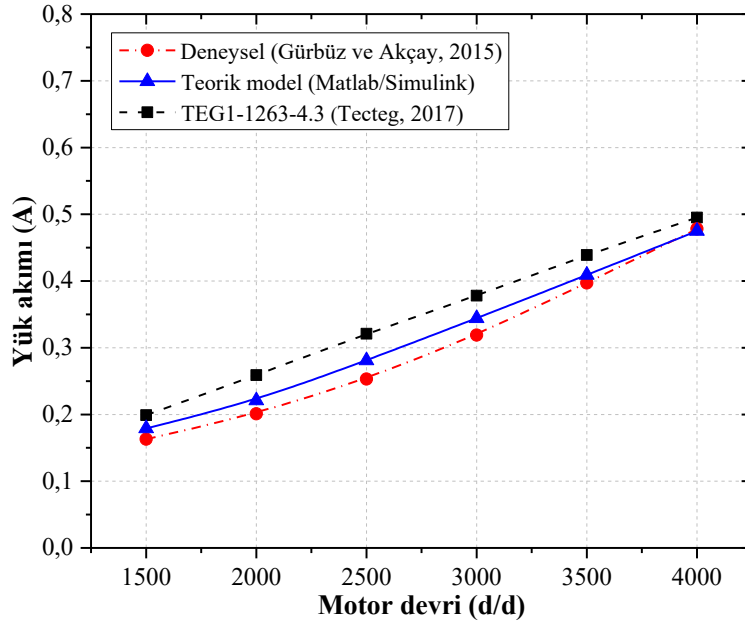
$$P_L = I_L^2 * R_L \quad (40)$$

Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik modelin akış diyagramı Şekil 2'de verilmiş ve her bir katman, akış diyagramı üzerinde tanımlanmıştır.

### 3. Araştırma Bulguları (Findings of Research)

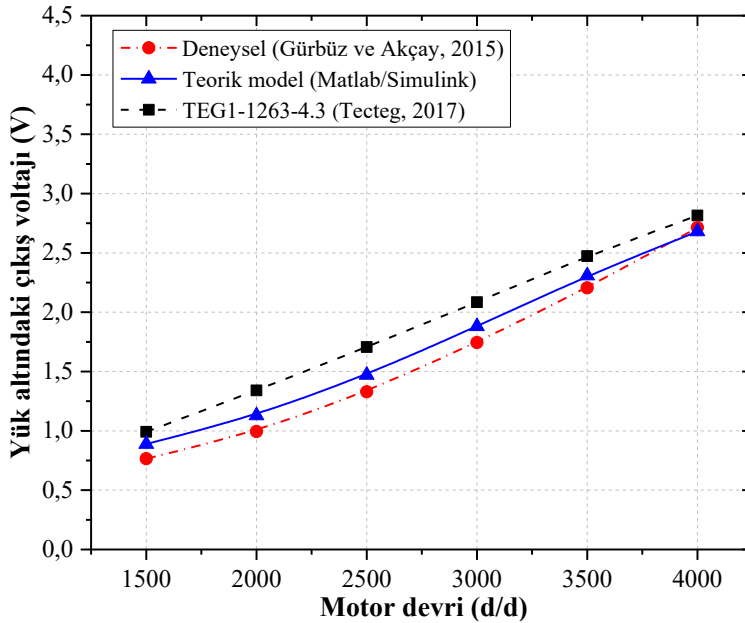
Motorun 1500-4000 d/d aralığı için bir adet TEG1-1263-4.3 tipi TEM kullanılarak Matlab/Simulink programı ile elde edilen yük akımının deneysel sonuçlar ve ürün katalog değerleri ile karşılaştırılması Şekil 5'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, motor devrinin artışıyla birlikte TEJ içinden geçen egzoz gazlarının sıcaklık ve debi artışına bağlı olarak TEJ'in çıkışındaki yük akımı artmaktadır. Motorun 1500-4000 d/d aralığında, Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik model kullanılarak hesaplanan yük akımı değerleri ile deneysel yük akımı sonuçları arasındaki farkın %9,9-0,6 aralığında değiştiği görülmektedir. Bununla birlikte, teorik model ve ürün katalog değerleri arasındaki fark ise motorun 1500-400 d/d aralığı için %17,2-4,2 aralığında değişmiştir. Bu sonuçlar, teorik modelin yük akımı sonuçları ile deneysel yük akımı sonuçları arasındaki farkın motor devrinin artışı ile azaldığını göstermektedir.





Şekil 5. Farklı motor devirleri için yük akımının değişimi (Variation of load current for different engine speeds)

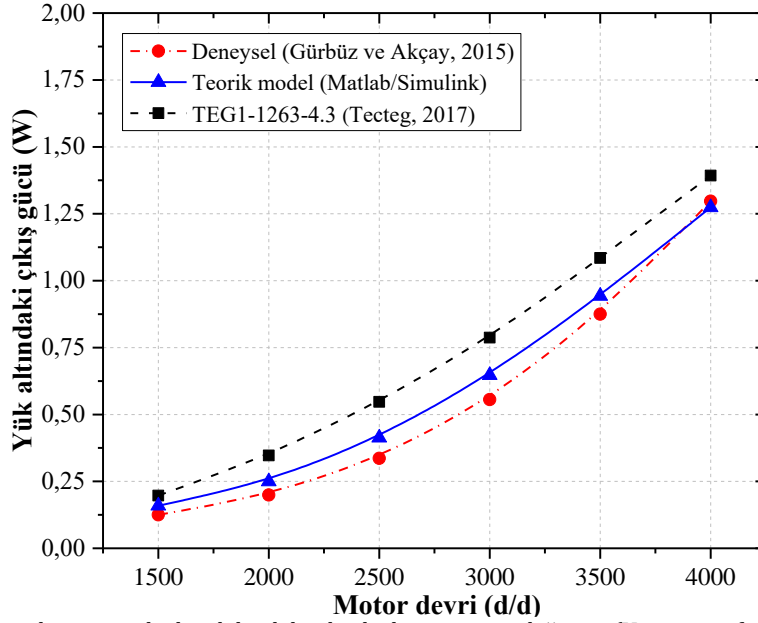
Şekil 6'da motorun 1500-4000 d/d aralığı için bir adet TEG1-1263-4.3 tipi TEM kullanılarak Matlab/Simulink programı ile elde edilen yük altındaki çıkış voltajının, deneysel çalışmanın sonuçları ve ürün katalog değerleri ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, motor devrinin artışıyla birlikte TEJ içerisine alınan egzoz gazlarının sıcaklık ve debi değerlerinin artışıyla birlikte TEJ'in yük altındaki çıkış akımı artmaktadır. 1500 d/d motor devrinde deneysel ve teorik çıkış voltajı sonuçları arasındaki fark %16,2 iken, motor devrinin 4000 d/d'ya artırılması ile deneysel ve teorik çıkış voltajı değerleri arasındaki farkın %1,2'ye azaldığı görülmektedir. Buna karşın, teorik model ile ürün katalog değerleri arasındaki fark, motorun 1500-400 d/d aralığı için %18,7-4,9 aralığında değişmektedir. Bu sonuçlar, teorik modelin yük altındaki çıkış voltajı ile deneysel çalışmaya ait yük altındaki çıkış voltajı sonuçları arasındaki farkın, motor devrinin artışı ile dikkate değer oranda azaldığını göstermektedir.



Şekil 6. Farklı motor devirleri için yük altındaki çıkış voltajının değişimi (Variation of matched output voltage for different engine speeds)

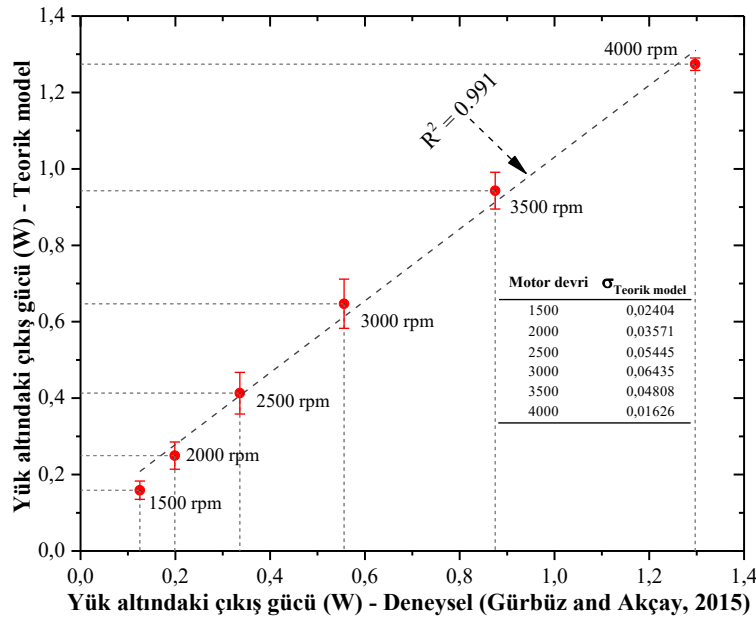
Motorun 1500-4000 d/d aralığı için bir adet TEG1-1263-4.3 tipi TEM kullanılarak Matlab/Simulink programı ile elde edilen yük altındaki elektriksel çıkış gücünün, deneysel çalışmanın sonuçları ve ürün katalog değerleri ile karşılaştırılması Şekil 7'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, genel olarak motor devrinin artışıyla birlikte TEJ içerisine alınan egzoz gazlarının sıcaklığı ve debisindeki artışa bağlı olarak TEJ'in çıkış gücü artmaktadır. Motorun 1500-4000 d/d aralığında Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik model ile deneysel çalışmada elde edilen TEJ'ün elektriksel çıkış gücü sonuçları arasındaki farkın %21,4-1,8 aralığında değiştiği görülmektedir.

Bununla birlikte, teorik model ve ürün katalog değerleri arasındaki fark ise motorun 1500-4000 d/d aralığı için %32,4-9,3 aralığında değişmiştir. Bu sonuçlar, teorik modelin çıkış gücü ile deneysel çıkış gücü sonuçları arasındaki farkın motor devrinin artışı ile azaldığını göstermektedir.



Şekil 7. Farklı motor devirleri için yük altındaki elektriksel çıkış gücünün değişimi (Variation of matched output power for different engine speeds)

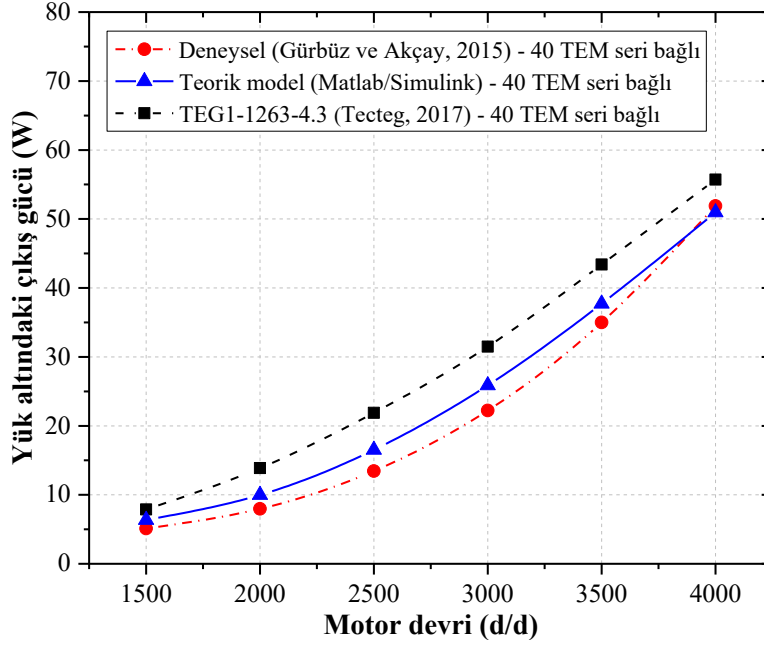
Şekil 8'de motorun farklı devirleri için deneysel ve teorik model ile elde edilen TEJ çıkış gücünün korelasyonu verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi motorun 1500-4000 d/d aralığında deneysel ve teorik modelin çıkış gücü değerleri arasındaki korelasyonun  $R^2 = 0,991$  gibi yüksek bir değerde olduğu görülmektedir. Bu sonuç, motorun 1500-4000 d/d aralığında teorik model ile deneysel TEJ çıkış gücü sonuçları arasında iyi bir uyumun olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, düşük (1500-2000 d/d) ve yüksek motor devirlerinde (4000 d/d) teorik model ile elde edilen TEJ çıkış gücü değerleri, deneysel sonuçlar referans alındığında oldukça düşük standart sapma değerine (4000 d/d'da  $\sigma_{\text{Teorik model}} = 0,016$ ) sahip iken, orta motor devirlerinde (2500-3500 d/d) teorik modelin standart sapma değerlerinin arttığı ve en yüksek sapma değerinin ( $\sigma_{\text{Teorik model}} = 0,064$ ) 3000 d/d'da olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Farklı motor devirleri için deneysel ve teorik model ile elde edilen TEJ çıkış gücünün korelasyonu (Correlation of TEG output power obtained by experimental and theoretical model for different engine speeds)

Şekil 9'da teorik model, deneysel ve ürün katalog sonuçlarına göre 40 adet TEM'ün seri bağlanması sonucu elde edilen yük altındaki TEJ çıkış gücünün karşılaştırması verilmektedir. Motor devrinin 1500 d/d'dan 4000 d/d'ya

artırılması ile teorik model ile deneysel sonuçlar arasındaki fark %19,5'den %1,8'e kadar azalmaktadır. Bununla birlikte, 40 adet TEG1-1263-4.3 tipi TEM seri olarak bağlanarak Matlab/Simulink programı ile elde edilen TEJ çıkış gücünün 1500 d/d'da 6,36 W'dan parabolik bir eğri ile artarak 4000 d/d'da 50,96 W'a ulaşmaktadır. Buna karşın 1500 d/d'da deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre minimum TEJ çıkış gücü 5,12 W iken 4000 d/d'da maksimum TEJ çıkış gücü 51,88 W değerindedir. Bu sonuç, maksimum TEJ çıkış gücü değerleri açısından deneysel ve teorik model (Matlab/Simulink) sonuçları arasındaki farkın oldukça düşük düzeyde (0,92 W) olduğunu göstermektedir. Ayrıca, motorun 1500-4000 d/d aralığında TEJ'ün elektriksel çıkış gücü açısından teorik model sonuçlarının deneysel çalışma sonuçları ile ürünün katalog değeri dikkate alınarak hesaplanan sonuçlar arasında yer almıştır. Bu bulgular, Matlab/Simulink programı kullanılarak geliştirilen teorik modelin, İYM'un egzoz atık ısı enerjisinden elektrik üretiminin gerçekleştirildiği TEJ'lerde kabul edilebilir bir hata oranı ile kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 9. 40 adet seri bağlı TEM için TEJ'ün yük altındaki çıkış gücü (Variation of matched output power of TEG for 40 TEM of connected in series versus engine speed)

#### 4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından iki silindirli, buji ateşlemeli bir motorun  $\frac{1}{2}$  gaz keleşliği açıklık oranı ve 1500-4000 d/d devir aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda tespit edilen TEJ girişindeki egzoz gazı sıcaklığı ve debisinin yanında MSS sıcaklık ve debi değerleri kullanılarak Matlab/Simulink programında 3 katmanlı teorik TEJ modeli geliştirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik TEJ modeli ile elde edilen yük altındaki akım, gerilim ve çıkış gücü değerleri, motorun 1500-4000 d/d aralığı için deneysel sonuçlar ve ürün katalog değerleri arasında değerler almış olup, deneysel sonuçlara daha yakındır. Motor devrinin 1500 d/d'dan 4000 d/d'ya artırılması ile deneysel ve teorik model sonuçları arasındaki fark azalmaktadır.
- Yük altındaki güç çıkışı açısından, teorik model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında  $R^2=0,991$  gibi yüksek bir korelasyon bulunmaktadır. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki fark 3000 d/d motor devrinde en yüksek değerde ( $\sigma_{\text{Teorik model}}=0,064$ ) iken 4000 d/d'da minimum değerdedir ( $\sigma_{\text{Teorik model}}=0,016$ ).
- Teorik TEJ modelinde, 40 adet TEM'ün seri bağlanması ile elde edilen TEJ çıkış gücü 1500 d/d motor devrinde 6,36 W iken motor devrinin 4000 d/d'ya artırılması ile TEJ çıkış gücü 50,96 W'a ulaşmaktadır. Motorun 4000 d/d devrindeki deneysel sonuçlarda ise TEJ çıkış gücü 51,88 W değerindedir. 4000 d/d motor devri için deneysel ve teorik model ile elde edilen TEJ çıkış gücü arasındaki fark %1,8 (0,92 W) gibi oldukça düşük bir değerdedir.
- Çalışmada elde edilen teorik model ile deneysel çalışma sonuçları arasında ortaya çıkan farklılıkların; deneysel çalışma şartları ve teorik modelde yapılan kabuller arasındaki farklılıkların yanında eşanjör yüzeyleri ve TEM yüzeyleri arasındaki yüzey kontak direncinden ve ayrıca p-n tipi yarı iletken malzemelerin sıcaklıkla birlikte seebeck katsayısında meydana gelen değişimlere bağlı olarak ortaya çıktığı öngörülmektedir.

- Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, Matlab/Simulink programı kullanılarak geliştirilen teorik modelinin İYM'un egzoz atık ısı enerjisinden elektrik üretiminin gerçekleştirildiği TEJ'lerde kabul edilebilir bir hata oranı ile kullanılabilceğini göstermektedir.
- Ancak, TEJ'lerin düşük dönüşüm veriminin artırılması açısından daha yüksek TEJ çıkış gücünün üretileceği eşanjör düzenlemeleri ve termoelektrik malzemelerin kullanımına yönelik daha fazla teorik ve deneysel çalışmaların yürütülmesi gerekmektedir. Yazarlar TEJ'ler hakkında yürütecekleri gelecek teorik ve deneysel çalışmalarda, bu konular üzerine odaklanmayı planlamaktadır.

### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmada, Doç. Dr. Habib Gürbüz'ün danışmanlığında Topalcı (2017) tarafından gerçekleştirilen Yüksek Lisans tezi kapsamında Matlab/Simulink programında oluşturulan teorik TEJ modelinin, geliştirilmiş versiyonu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Matlab/Simulink programı 2017 yılı için Ümit TOPALCI adına lisanslıdır.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

### Referanslar (References)

- Akçay H., 2015. LPG ile Çalışan Buji Ateşlemeli Bir Motorda, Egzoz ve Soğutma Sisteminde Kaybedilen Isının TEJ Modülü ile Kullanılabilir Enerjiye Dönüştürülmesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD.
- Chen L., Cao D., Huang Y., Peng F.Z., 2008. Modeling and Power Conditioning for Thermoelectric Generation, Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, 1098-1103, 15-19.
- Chen M., Rosendahl L.A., Condra T.J., Pedersen J.K., 2009. Numerical Modeling of Thermoelectric Generators with Varying Material Properties in a Circuit Simulator, IEEE Transactions on Energy Conversion, 24(1), 112-124.
- Dalola S., Ferrari M., Ferrari V., Guizetti M., Marioli D., Taroni A., 2009. Characterization of Thermoelectric Modules Powering Autonomous, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 58(1), 99-107.
- Derun E. M., 2005. Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> ve Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> içerikli bileşiklerin termoelektrik, yapısal ve mikro yapısal özelliklerinin incelenmesi Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 18-32.
- Doğdu, M.F., 2013. Termoelektrik Soğutucuların Performansına Doğrudan Temaslı Isı Değiştiricilerin Etkilerinin Deneysel İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 115s, İstanbul.
- Dresselhaus M.S., Chen G., Tang M.Y., Yang R., Lee H., Wand D., Ren Z., Fleurial J. P. & P. Gonga, 2007. New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials, Advanced Materials, 19(8), 1043- 1057.
- Dziurdzia P., Mirocha A., 2009. From Constant to Temperature Dependent parameters Based Electrothermal Models of TEG, XIV. Mixedes International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits Systems, Lodz, 555-559, 25-27.
- Freedman A.P., (2011), A thermoelectric generation subsystem model for heat recovery simulations. Rochester Institute of Technology
- Güneş, S., Hançer, E., 2017. Termoelektrik Modül Kullanarak İçten Yanmalı bir Otomobilin Egzozundan Atılan Isıdan Enerji Geri Kazanımının Termal Analizi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 33(3), 1-12.
- Gürbüz H., Akçay H., 2015. Experimental Investigation of an Improved Exhaust Recovery System for Liquid Petroleum Gas Fueled Spark ignition Engine, Thermal Science, 19(6), 2015.
- Hsu, C., Huang, G., Chu, H., Yu, B., Yao, D., 2011. Experiments and Simulations on Low-Temperature Waste Heat Harvesting System by Thermoelectric Power Generators. Applied Energy, 88, 1291-1297.
- <http://tecteg.com/thermoelectric-power-modules-sizes-selection/>, Date of access and time: 10.21.2017/ 18:30.
- Ikoma K., Munekiyo M., Furuya K., Kobayashi M., Izumi T., Shinohara K., 1998. Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles, XVII. International Conference on Thermoelectrics, Nagoya, 464- 467, 24-28.
- Karri M.A., 2011. Thermoelectric power generation system optimization studies. Clarkson University.
- Khattab N.M., El Shenawy E.T., 2006. Optimal Operation of Thermoelectric Cooler Driven by Solar Thermoelectric Generator", Energy Conversion and Management, 47(4), 407-426.
- Kunt M.A., 2016. İçten Yanmalı Motor Atık Isılarının Geri Kazanımında Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanımı. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 3(2), 192-203.
- Kunt M.A., Gunes H., 2017, Experimental Investigation of the Performance of Different Heat Exchanger Profiles in the Waste Heat Recovery System with Thermoelectric Generator for Automobile Exhaust Systems, SSRG journal, 4(8), 1-5.
- Lertsatitthanakorn C., 2007. Electrical Performance Analysis and Economic Evaluation of Combined Biomass Cook Stove Thermoelectric (BITE) Generator, Bioresource Technology, 98(8), 1670-1674.
- LPG ile Çalışan Buji Ateşlemeli Bir Motorda, Egzoz ve Soğutma Sisteminde Kaybedilen Isının TEJ Modülü ile Kullanılabilir Enerjiye Dönüştürülmesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD.
- Rowe D.M., Bhandari C.M., 1983. Modern Thermoelectrics. Holt-Technology, 168s, London.
- Taymaz, İ., Çakır, K., Gür, M., and Mimaroglu, A., 2003. Experimental Investigation of Heat Losses in a Ceramic Coated Diesel Engine. Surface and Coatings Technology, (169-170), 168-170.
- Tecteg, (2017, December 18). Specifications TEG Module TEG1-1263-4.3, Retrieved from <https://tecteg.com/store-thermoelectric-power-module-selection-purchase/30x30-35x35/>
- Temizer İ., İlkılıç C., Öner C. 2016. Dizel Motor Egzoz Sistemi için Termoelektrik Jeneratör Uygulaması ve Akış Analizi. Afyon

- Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 16 (025901), 431-445.
- Topalci Ü., 2017, Taşıt Egzoz Gazı Atık Isı Enerjisinden Elektrik Enerjisinin Üretilmesi için Termoelektrik Jeneratörün Modellenmesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği ABD.
- Yavuz, C., Özkaymak, M., & Kaya, M. 2010. Termoelektrik Modüllü Su Soğutucusunda Farklı Hava Debilerinin Sistem Performansına Etkileri. e-Journal of New World Sciences Academy, 5, 131-143.
- Yu S., Du Q., Diao H., Shu G., Jiao K. 2015. Effect of Vehicle Driving Conditions on the Performance of Thermoelectric Generator. Energy Conversion and Management, 96, 363-376.



## ENVIRONMENTAL IMPACT AND COST ASSESSMENT OF COMMERCIAL FLIGHT INDUCED EXHAUST EMISSIONS AT ISPARTA SÜLEYMAN DEMİREL AIRPORT

Selçuk EKİCİ<sup>1\*</sup>, Yasin ŞÖHRET<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Iğdır University, Faculty of Business and Administration, Dept. of Aviation Management, Iğdır, Türkiye

<sup>2</sup> Süleyman Demirel University, School of Civil Aviation, Dept. of Airframe and Powerplant Maintenance, Isparta, Türkiye

### Keywords

*Environmental Impact, Emissions, Cost, Aviation, Aircraft Engine.*

### Abstract

Airway is one of the widely preferred transportation in Turkey since investment in the sector in the last decade. Increase in interest to airway causes more energy consumption and emissions. Thus evaluation of air transportation induced emissions draws attention of researchers. In this framework the current paper discusses environmental and economic evaluation of emissions from aircraft in Isparta Süleyman Demirel Airport in 2018. At the end of the study March month of the year is determined to be the period that environmental impact and environmental cost reach peak point.

## ISPARTA SÜLEYMAN DEMİREL HAVALİMANINDA TİCARİ UÇUŞLAR KAYNAKLI EGZOZ EMİSYONLARININ ÇEVRESEL ETKİLERİ VE MALİYET DEĞERLENDİRMESİ

### Anahtar Kelimeler

*Çevresel Etki, Emisyon, Maliyet, Havacılık, Uçak Motoru.*

### Öz

Son yıllardaki havacılık alanına yapılan yatırımlar nedeniyle Türkiye’de havayolu yaygın olarak tercih edilen ulaşım yollarından birisidir. Havayoluna olan ilginin artışı daha fazla enerji tüketimi ve emisyonların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle hava taşımacılığında kaynaklı emisyonların incelenmesi araştırmacıların dikkatini ve ilgisini çekmektedir. Bu çerçevede bu çalışma 2018 yılında Isparta Süleyman Demirel Havaalanı’nda uçaklardan kaynaklanan emisyonların çevresel ve ekonomik değerlendirmesini ele almaktadır. Çalışma sonucunda Mart ayı çevresel etki ve çevresel maliyetlerin en üst noktaya ulaştığı dönem olarak belirlenmiştir.

### Alıntı / Cite

Ekici, S., Şöhret, Y., (2020). Environmental Impact and Cost Assessment of Commercial Flight Induced Exhaust Emissions at Isparta Süleyman Demirel Airport, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(2), 597-604.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Ekici, 0000-0002-7090-3243  
Y. Şöhret, 0000-0002-6821-3366

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	26.03.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	14.05.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	17.05.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

## 1. Introduction

Air way is commonly preferred transportation option for providing time saving and being comfy lately. Another reason of interest to air transportation is prevalence of airports worldwide, particularly in Turkey since 2005. If investment of Turkish government in transportation sector in the last decade is considered accessibility to air transportation is an expected situation. According to the statistical data released by General Directorate of State Airports Authority (2020) total air passenger number has increased 102% from 2010 to 2019 whereas number of total flights has risen 67.4% in the same time period. On the other hand global air passenger number annual rise rate in the last ten years is averagely 5.6% whereas this rate for Turkey is 8.1% (ICAO, 2019; General Directorate of State Airports Authority, 2020).

\* İlgili yazar / Corresponding author: selcukekici@gmail.com, +90-505-456-2007

Growth rate of air transportation both globally and locally in Turkey also induce some major issues such as depletion of energy resources, global warming, climate change and so on (Konuralp, 2020; Lee et al., 2009; Terrenoire et al., 2019). For this reason, numerous studies on energy consumption related environmental impact of air transportation, particularly focusing on aircraft emissions, have been presented to the literature. Elbir (2008) presented estimation of aircraft emissions at Adnan Menderes Airport for the year of 2004. For this purpose, recorded emissions data of landing and take-off was used. At the end of the study annual emissions at full capacity operation conditions of airport were reported. Similarly, Yilmaz and İlbas (2012) discussed exhaust emissions of commonly used and still in service aircraft engines in their paper. Within this context authors compared engine emissions and fuel consumptions using ICAO databank at varying engine power setting. Ekici et al. (2013) noted growth rate of aviation fleet in Turkey and evaluated aircraft emissions in the busiest five airports in Turkey for the year of 2012. Authors concluded Atatürk Airport to be the main pollution source among evaluated airports. Miyoshi and Mason (2013) introduced carbon foot print estimation of passengers at Manchester Airport. According to the main findings of the study drop-off and pick-up, and minicab users were determined to be main source of the high carbon emissions and environmental damage cost. In another paper (Unal et al., 2014) Nevşehir Kapadokya Airport was evaluated in terms of emissions and noise regarding Green Airport requirements of the authority. To calculate emissions in the airport methodology asserted by IPCC was employed. In addition to aircraft emissions emitted gases from heat center of the airport was also considered. Altuntas (2014) calculated global warming potential value for aircrafts in service of domestic flights across Turkey. As a result of the study global warming potential per passenger from 2002 to 2012 was found to be 15.35 CO<sub>2</sub>e. Koudis et al. (2017) asserted to reduce engine thrust settings at ground operation for pollutant emissions reduction at airports. In this manner flight data records of London Heathrow Airport were used to analyze impact of reduced take-off. At the end of the study fuel consumption and nitrogen oxide emissions were found to be reduced 1-23.2% and 10.7-47.7%, respectively. Evertse and Visser (2017) developed a taxi movement planning system for aircrafts to minimize emissions induced by taxi operations in the airports. Authors recommended this tool to be beneficial for busy airports facing dense traffic due to stringent environmental regulations. Yilmaz (2017) evaluated aircraft emissions in Kayseri Airport for the year of 2010. At the end of the study decrease of 2 minutes in taxiing time was concluded to lead approximately 4% reduction of landing and take-off emissions whereas 25% rise in LTO cycles was found to cause approximately 11% increase emissions. Ozgunoglu and Uygur (2017) discussed aircraft emissions at Kahramanmaraş Airport in 2016 with the aid of tier approach of IPCC. Authors deduced to validate and improve the analysis by experimental studies with the intent of elimination of calculation deficiency. Yang et al. (2018) discussed emissions at Beijing Capital International Airport, the second busiest airport on the earth. Nitrogen oxide emissions were found to be emitted mostly during take-off and climb-out phases of flight whereas carbon monoxide and hydrocarbon emissions were determined to be emitted at taxiing. Another study (Kuzu, 2018) presented aircraft emissions in Atatürk International Airport. According to the research nitrogen oxide, carbon monoxide, and hydro carbon emissions were calculated to be 4249, 2153, and 181 tons annually, respectively. Additionally, climb phase of flight was determined to be the main source of nitrogen oxide emissions. Chilongola and Ahyudanari (2019) presented emissions evaluation for Juanda International Airport Indonesia. Advanced ICAO LTO cycle method was employed during the research. Makridis and Lazaridis (2019) employed AERMOD Gaussian dispersion model for determination of pollutants from aircraft in Chania airport. According to the findings concentration of pollutants were determined to be lower than air quality threshold values. As it is comprehended from the literature survey many more latest studies relevant to topic can be accessed (Zhang et al., 2019; Li, et al., 2019; Zhou et al., 2019; Taghizadeh et al., 2019; Kumas et al., 2019; Xu et al., 2020a, Xu et al., 2020b). In other respects, most of the studies reveal aircraft emissions at airports amount while limited number of papers discuss environmental impact and economics of emissions.

The main goal of the current paper is introducing emissions, environmental impact and economics of emissions at Isparta Süleyman Demirel Airport. Thus real time recorded data is used to evaluate environmental and economical aspects of commercial flights induced aircraft engine emissions using a novel approach. Differently from previous studies environmental impact, and environmental impact cost values are calculated in addition to carbon foot print values.

## 2. Materials and Method

Air transportation passenger number variation with years in Turkey is plotted in Fig. 1. According to the plot approximately half of the passengers in each year is international whereas the other half is domestic passenger.

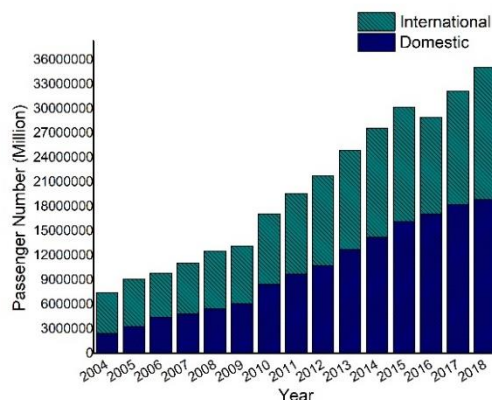


Figure 1. Airway Passenger Number in Turkey by years (TSI, 2020)

Isparta Süleyman Demirel Airport was established in 1997 at Keçiborlu district of Isparta (37°51`21"N, 30°22`01"E). ICAO code of the airport is LTFC whereas it is coded to be ISE by IATA. The airport mostly serves to flight training schools as well as it is open to domestic and international flights. Passenger density and commercial flight traffic in the airport is lower than average value of Turkey. If Figs. 1 and 2 are compared this implication can easily be addressed. On the other hand, total take-off count in Isparta Süleyman Demirel Airport is 23,131 while overall take-off count in Turkey is 1,544,169 by the end of 2018.

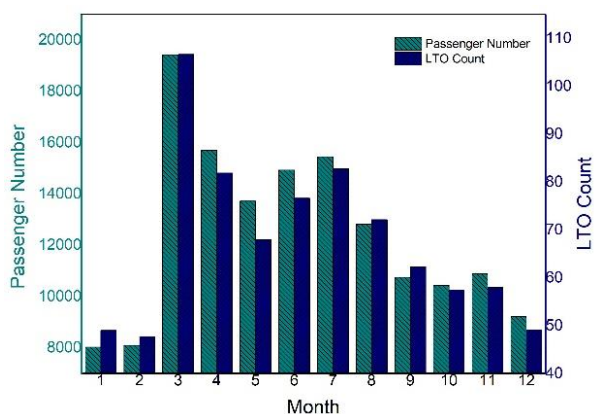


Figure 2. Airway Passenger Number and LTO Count in ISE Airport in 2018

In the current study environmental impact and economics of emitted exhaust gases from aircraft at Isparta Süleyman Demirel Airport during the landing and take-off cycle are evaluated. For this purpose, real time recorded emissions data obtained from Ministry of Transport and Infrastructure of the Republic of Turkey is analyzed. According to the provided data total take-off count of commercial flights (excluding training, private, military flights) is 812 while commercial flight passenger number is 149,458 in 2018. In Fig. 2 monthly variation of take-off count and passenger number of commercial flights is plotted. The data set also includes airway company, type of aircraft and its engine, passenger number, count of landing and take-off, average time of each flight phase during landing and take-off, mass flow rates of fuel consumption as well as unburned hydrocarbon, nitrogen oxide, and carbon dioxide emissions during the landing and take-off cycle. Distribution of aircraft type and take-off count of each aircraft type evaluated in the framework of the study are listed in Table 1.

**Table 1.** Data of Examined Aircraft Types

Type	Number	Take-Off Count
A330-200	12	122
A340-300	1	1
A319	13	113
A320	20	241
A321	14	58
B737-700 pax	4	10
B737-800	14	197
B737-900	5	11
MD82	6	28
MD83	9	30



## 2.1. Environmental Impact Assessment

Environmental impact assessment of aircraft induced emissions in Isparta Süleyman Demirel Airport is performed using two indicators: carbon foot print, and environmental impact factor.

**Table 2.** Carbon Foot Print of Emissions (IPCC, 2019)

Emissions	Carbon Foot Print (CO <sub>2</sub> e/kg)
CO	1
CO <sub>2</sub>	1
UHC	21
NO <sub>x</sub>	310

Carbon foot print calculation methodology follows global warming potential for 100 years value. According to this approach contribution of each gas to the global warming is evaluated relatively to carbon dioxide. In Table 2 carbon footprint value of emitted gases is given. To calculate carbon footprint following statement can be written:

$$CFP = \sum m_i c f p_i \quad (1)$$

Here  $CFP$  notates total carbon footprint of emissions whereas  $c f p_i$  is the carbon footprint of each emission gas.

**Table 3.** Eco-Indicator of Emissions (Meyer et al., 2009)

Emissions	Specific Environmental Impact Factor (mPts/kg)
CO	8.363
CO <sub>2</sub>	54.545
UHC	114.622
NO <sub>x</sub>	2749.360

Environmental impact of emissions is measured in terms of eco-indicator values. These values listed in Table 3 indicate the bad effect on the environment in terms of life cycle assessment studies. Environmental impact of emissions is calculated by:

$$B = \sum m_i b_i \quad (2)$$

In Eq. 2  $B$  is the total environmental impact of emissions whereas  $b_i$  represents specific environmental impact factor of each emitted gas.

## 2.2. Cost Assessment

Eco-cost approach is preferred in the present paper to determine cost of emissions from aircraft engines in the airport. Eco-cost value of each emissions is listed in Table 4. The eco-cost value fundamentally indicates preventing cost of emissions formation and it is found by:

$$C = \sum m_i c_i \quad (3)$$

whereas  $C$  and  $c_i$  are total eco-cost of emissions and eco-cost value of each emissions.

**Table 4.** Eco-Cost Values of Emissions (Vogtlander, 2019)

Emissions	Eco-Cost Value (€/kg)
CO	0.27
CO <sub>2</sub>	0.116
UHC	3.538
NO <sub>x</sub>	6.65

## 3. Results and Discussion

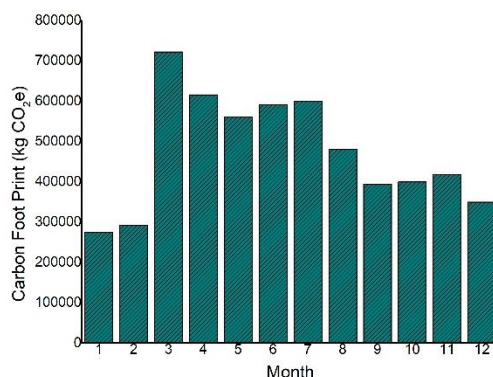
In the current paper environmental and economic aspects of commercial flights induced aircraft engine emissions are investigated. In this regard real time recorded emissions data obtained from Ministry of Transport and Infrastructure of the Republic of Turkey is analyzed. To measure the environmental impact of the emissions carbon foot print and environmental impact values are calculated. Main findings of the study are also summarized in

Table 5. In Table 5 sum of carbon foot print, environmental impact and environmental cost is listed dependent to months. For a better understanding first line of the second column can be addressed to be total carbon foot print of commercial flights during the first month of the year 2018.

**Table 5.** Environmental and Economic Results

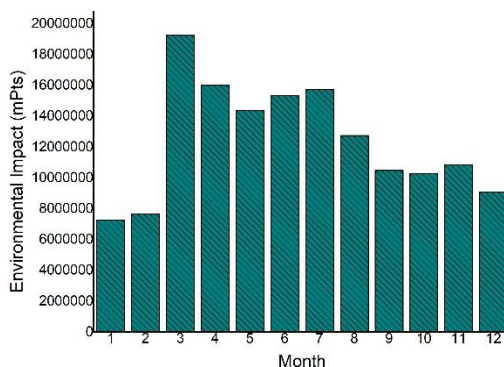
Month	Carbon Foot Print (kg CO <sub>2</sub> e)	Environmental Impact (mPts)	Environmental Cost (€)
1	274511.855	7278716.844	16048.293
2	292062.446	7639303.558	16830.801
3	721519.972	19248107.562	42395.984
4	615529.288	15999679.456	35372.470
5	560417.386	14393353.248	31838.879
6	590862.564	15350739.364	33901.083
7	600194.425	15732551.511	34770.613
8	480196.668	12743253.013	28140.928
9	393776.800	10478462.198	23145.695
10	399401.209	10268514.603	22689.599
11	417601.950	10842572.657	23910.334
12	349066.370	9068277.737	19997.671

In Fig. 3 monthly variation of carbon foot print of total emissions through year is plotted. As an expected result tendency of carbon foot print variation reaches to peak at the month when take-off count is maximum. On the other hand, carbon foot print is lower in January, February, and December months relatively to other months of the year. Total carbon foot print of emitted gases through the year is also calculated to be 5695140.933 kg CO<sub>2</sub>e while CO, HC, CO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> is responsible of total carbon foot print by percentages of 0.07%, 0.20%, 37.89%, and 61.82%, respectively.



**Figure 3.** Monthly Variation of Carbon Foot Print

According to plotted monthly variation of environmental impact in Fig. 4 the highest environmental impact is found to be 19248107.562 mPts in the March. Maximum take-off count in March is the main reason of that can be considered.



**Figure 4.** Monthly Variation of Environmental Impact

Monthly variation of environmental cost is graphed in Fig. 5. As it is comprehended tendency of Figs. 4 and 5 are similar due to monthly emissions variation. According to Fig. 5 the highest environmental cost is found to be 42395.984 Euro in the March whereas the minimum value is 16048.293 Euro.

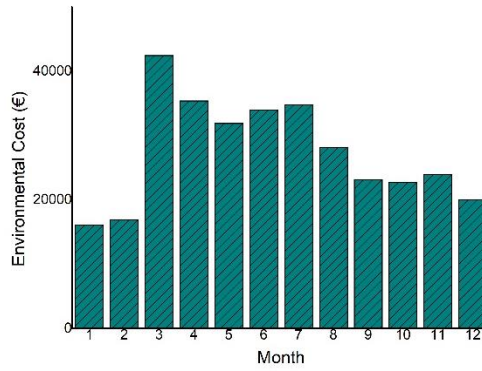


Figure 5. Monthly Variation of Environmental Cost

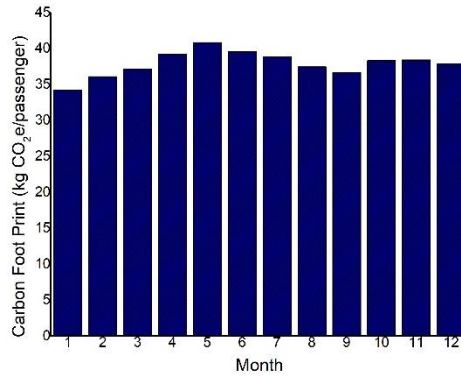


Figure 6. Monthly Variation of Carbon Foot Print per Passenger

Fig. 6 demonstrates monthly variation of carbon foot print per passenger. Maximum carbon foot print per passenger is calculated to be 40.841 kg CO<sub>2</sub>e in May whereas the minimum value is found to be 34.203 kg CO<sub>2</sub>e in the month of January. Similar to carbon foot print per passenger environmental impact per passenger is graphed in Fig. 7. The highest environmental impact of each passenger is calculated to be 1048.925 mPts while the lowest environmental impact of each passenger is 906.892 mPts.

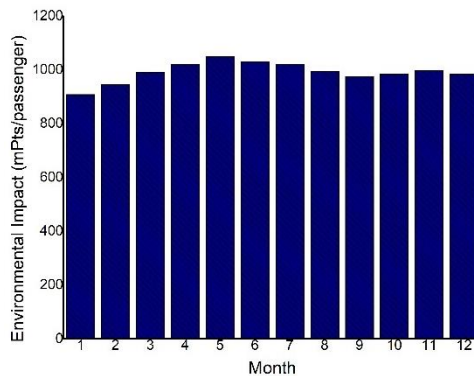
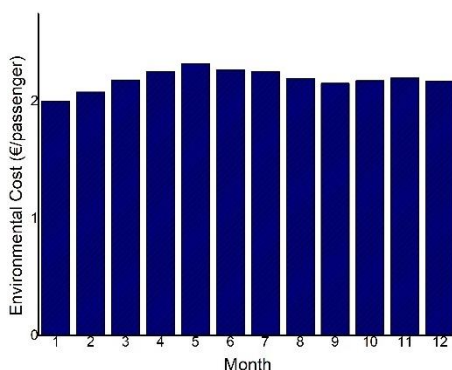


Figure 7. Monthly Variation of Environmental Impact per Passenger

Fig. 8 is plotted to show monthly variation of environmental cost per passenger. As it is expected tendency of environmental cost per passenger is same to both carbon foot print per passenger and environmental impact per passenger. Maximum environmental cost per passenger is determined to be 2.320 Euros whereas it is reduced to 2.000 Euros in January.

If passenger-based results are evaluated monthly variation of each indicator is related to both take-off count and passenger number. For this reason Fig. 2 should be re-considered for a better understanding. Even overall indicators reach to peak in March month the gap between take-off count and passenger number in May leads maximum value of indicators per passenger. On the other hand small gap between take-off count and passenger number is the main reason of the approximate value of indicators per passenger through the year excluding month of May. Calculated indicators per passenger are also summarized in Table 6.



**Figure 8.** Monthly Variation of Environmental Cost per Passenger

In addition to passenger based evaluation of results, findings can be discussed regarding domestic and international flights. 40.38% of total passengers flew internationally whereas 59.61% is domestic passenger. On the other hand carbon foot print of international flights is 2647493.06 kg CO<sub>2e</sub> while domestic flights have carbon foot print of 3047647.87 kg CO<sub>2e</sub>. Additionally environmental impact and environmental cost of international flights are 67861168.79 mPts and 149678.854 Euros, respectively.

**Table 6.** Passenger Based Environmental and Economic Results

Month	Carbon Foot Print (kg CO <sub>2e</sub> /passenger)	Environmental Impact (mPts/passenger)	Environmental Cost (€/passenger)
1	34.203	906.892	2.000
2	36.079	943.706	2.079
3	37.144	990.894	2.183
4	39.176	1018.310	2.251
5	40.841	1048.925	2.320
6	39.576	1028.181	2.271
7	38.848	1018.288	2.251
8	37.439	993.548	2.194
9	36.630	974.741	2.153
10	38.297	984.612	2.176
11	38.393	996.835	2.198
12	37.876	983.971	2.170

**Table 7.** Distribution of Environmental and Economic Results

Passenger Number	Carbon Foot Print (kg CO <sub>2e</sub> )	Environmental Impact (mPts)	Environmental Cost (€)
International	60361	2647493.06	67861168.79
Domestic	89097	3047647.87	81182362.96
			149678.854
			179363.495

#### 4. Conclusion

The current paper introduces environmental and economic aspects of emitted exhaust gases from aircraft in the Isparta Süleyman Demirel Airport in the year of 2018. Within this context carbon foot print, environmental impact, and environmental cost are calculated. Thus real time data is obtained from the Ministry of Transport and Infrastructure of Republic of Turkey is used. The employed methodology is beneficial to determine the environmental impact and cost induced by environmental impact. Additionally, asserted methodology can be applied on different systems for environmental evaluation and/or optimization. According to the main findings of the study March month of the year is determined to be the peak point of the year regarding overall carbon foot print, environmental impact, and environmental cost values whereas April month of the year is found to be the peak point of the year regarding passenger based carbon foot print, environmental impact, and environmental cost values.

#### Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

#### References

Altuntas, O., 2014. Calculation of domestic flight-caused global warming potential from aircraft emissions in Turkish airports. *International Journal of Global Warming*, 6 (4), 367-379.

- Chilongola, F. D., Ahyudanari, E., 2019. Aviation and Aircraft Engine Emissions at Juanda IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 645, 012022.
- Ekici, S., Yalin, G., Altuntas, O., Karakoc, T. H., 2013. Calculation of HC, CO and NO<sub>x</sub> from civil aviation in Turkey in 2012. *International Journal of Environment and Pollution*, 53 (3-4), 232-244.
- Elbir, T., 2008. Estimation of engine emissions from commercial aircraft at a mid-sized Turkish airport. *Journal of Environmental Engineering*, 134 (3), 210-215.
- Evertse, C., Visser, H. G., 2017. Real-time airport surface movement planning: Minimizing aircraft emissions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 79, 224-241.
- General Directorate of State Airports Authority, 2020. Aircraft, passenger, load series and forecasts. <https://www.dhmi.gov.tr/sayfalar/Statistics.aspx> (Accessed on March 02, 2020).
- ICAO, 2019. Annual Report of the Council-2018. <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/default.aspx> (Accessed on March 04, 2020).
- IPCC, 2019. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Konuralp, E., 2020. Between neoliberal appetite and environmentalist reservations: The political economy of sustainable aviation. *International Journal of Sustainable Aviation*, In press.
- Koudis, G. S., Hu, S. J., Majumdar, A., Jones, R., Stettler, M. E., 2017. Airport emissions reductions from reduced thrust takeoff operations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 15-28.
- Kumas, K., Inan, O., Akyuz, A. Ö., Gungor, A., 2019. Muğla Dalaman Havalimanı Uçaklardan Kaynaklanan Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7 (2), 291-297.
- Kuzu, S. L., 2018. Estimation and dispersion modeling of landing and take-off (LTO) cycle emissions from Atatürk International Airport. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11 (2), 153-161.
- Lee, D., Fahey, D., Forster, P., Newton, P., Wit, R., Lim, L., Owen, B., Sausen, R., 2009. Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 43 (22-23), 3520-3537.
- Li, N., Sun, Y., Yu, J., Li, J. C., Zhang, H. F., Tsai, S., 2019. An Empirical Study on Low Emission Taxiing Path Optimization of Aircrafts on Airport Surfaces from the Perspective of Reducing Carbon Emissions. *Energies*, 12 (9), 1649.
- Makridis, M., Lazaridis, M., 2019. Dispersion modeling of gaseous and particulate matter emissions from aircraft activity at Chania Airport, Greece. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 12 (8), 933-943.
- Meyer, L., Tsatsaronis, G., Buchgeister, J. and Schebek, L., 2009. Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. *Energy*, 34 (1), 75-89.
- Miyoshi, C., Mason, K. J., 2013. The damage cost of carbon dioxide emissions produced by passengers on airport surface access: the case of Manchester Airport. *Journal of Transport Geography*, 28, 137-143.
- Ozgunoglu, K., Uygur, N., 2017. Kahramanmaraş Havalimanı İçin Uçaklardan Kaynaklanan Emisyonların Belirlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20 (3), 24-30.
- Taghizadeh, S. A., Shafabakhsh, G. H., Aghayan, I., 2019. Evaluation of aircraft emission at Imam Khomeini International Airport and Mehrabad International Airport. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16 (11), 6587-6598.
- Terrenoire, E., Hauglustaine, D. A., Gasser, T., Penanhoat, O., 2019. The contribution of carbon dioxide emissions from the aviation sector to future climate change. *Environmental Research Letters*, 14 (8), 084019.
- Thanjangreeda, W., Chuersuanb, N., 2020. Commercial Aircraft Emission Estimates with 1 km x 1 km Resolution: A Case of Departure Flights at Suvarnabhumi Airport. *Environment Asia*, 13, 10-17.
- TSI, 2019. Total Passenger and Freight Traffic at Airports. [http://www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab\\_id=1051](http://www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=1051) (Accessed on March 20, 2020).
- Unal, I., Türkoğlu, F., Doğan, B., 2014. Nevşehir Kapadokya Havalimanının Emisyon ve Gürültü Açısından Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 55 (654), 24-29.
- Vogtlander, J., 2019. Data on Eco-Costs. Netherlands: Delft University of Technology.
- Xu, H., Fu, Q., Yu, Y., Liu, Q., Pan, J., Cheng, J., Wang, Z., Liu, L., 2020. Quantifying aircraft emissions of Shanghai Pudong International Airport with aircraft ground operational data. *Environmental Pollution*, 261, 114115.
- Xu, H., Xiao, K., Cheng, J., Yu, Y., Liu, Q., Pan, J., Chen, J., Chen, F., Fu, Q., 2020. Characterizing aircraft engine fuel and emission parameters of taxi phase for Shanghai Hongqiao International Airport with aircraft operational data. *Science of The Total Environment*, 720, 137431.
- Yang, X., Cheng, S., Lang, J., Xu, R., Lv, Z., 2018. Characterization of aircraft emissions and air quality impacts of an international airport. *Journal of Environmental Sciences*, 72, 198-207.
- Yilmaz, I., 2017. Emissions from passenger aircraft at Kayseri Airport, Turkey. *Journal of Air Transport Management*, 58, 176-182.
- Yilmaz, I., Ilbas, M., 2012. Gaz türbinli uçak motorlarında kirletici emisyonların incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (2), 343-351.
- Zhang, M., Huang, Q., Liu, S., Li, H., 2019. Assessment Method of Fuel Consumption and Emissions of Aircraft during Taxiing on Airport Surface under Given Meteorological Conditions. *Sustainability*, 11 (21), 6110.
- Zhou, Y., Jiao, Y., Lang, J., Chen, D., Huang, C., Wei, P., Li, S., Cheng, S., 2019. Improved estimation of air pollutant emissions from landing and takeoff cycles of civil aircraft in China. *Environmental Pollution*, 249, 463-471.



## FOSFORİK ASİDİN REJENERE SELÜLOZ ESASLI LİFLER ÜZERİNE ETKİSİ

Kemal Şahin TUNÇEL\*

Siirt Üniversitesi, Geleneksel El Sanatları Bölümü, Siirt, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Termal Stabilizasyon,  
Rejenere Selüloz Lif,  
Viskoz Rayon,  
Fosforik Asit.*

### Öz

Bu çalışmada, rejenere selüloz liflerinin en önemli üyelerinden biri olan viskoz rayon lifleri ele alınmıştır. Bu liflerin termal stabilizasyonu için 25°C'de fosforik asit ile kimyasal ön işlem yapılmıştır. Fosforik asidin viskoz lifleri üzerinde ki etkisi 235°C'de farklı sürelerde gerçekleşen ısı işlemler ile stabilizasyon süresinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Isıl işlemler sonrasında; iplik numarası, lif kalınlığı, yoğunluk ve mukavemet gibi fiziksel ve yapısal özelliklerde ki değişimler incelenmiştir. Stabilizasyon süresinin artmasıyla lif kalınlığı ve iplik numarası azalırken, yoğunluk değerleri artmıştır. Gerilme mukavemeti ise, belirli bir stabilizasyon süresine kadar azalma eğilimindeyken, 45 dakikalık stabilizasyon işlemiyle beraber artmıştır. Diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) yöntemi ile de viskoz rayon liflerinin termal özelliklerindeki değişimler gösterilmiştir. Stabilizasyon süresi arttıkça viskoz rayon liflerinin kristal yapısındaki değişimler sebebiyle bozunma endotermi yaklaşık olarak 109°C azalmıştır. 45 dakikalık ısı işleminden sonra bozunma endotermi neredeyse yok olmuştur. Aynı zamanda ısı işlemlerden sonra viskoz rayon liflerinde beyazdan siyaha doğru renk değişimleri gözlenmiştir.

## EFFECT OF PHOSPHORIC ACID ON REGENERATED CELLULOSE BASED FIBERS

### Keywords

*Thermal Stabilization,  
Regenerated Cellulose Fiber,  
Viscose Rayon,  
Phosphoric Acid.*

### Abstract

In this study, viscose rayon fibers that one of the most important members of regenerated cellulose fibers, are discussed. For thermal stabilization of these fibers, chemical pre-treatment with phosphoric acid at 25°C was performed. The effect of phosphoric acid on viscose fibers was evaluated as a function of the stabilization time with thermal processes at different periods of time of 235°C. After heat treatments; changes in physical and structural properties such as linear density, fiber thickness, density and tensile strength were investigated. With the increase in the stabilization time, fiber thickness and linear density decreased while density values increased. Tensile strength; while it tended to decrease until a certain stabilization time, it started to increase with 45 minutes stabilization process. Changes in the thermal properties of viscose rayon fibers are also shown by differential scanning calorimetry (DSC). As the stabilization time increased, the degradation endotherm was decreased by about 109°C due to the changes in the crystal structure of the viscose rayon fibers. After 45 minutes of heat treatment, the degradation endotherm has almost disappeared. At the same time, color changes from white to black were observed in viscose rayon fibers after heat treatment.

### Alıntı / Cite

Tunçel, K.Ş., (2020). Fosforik Asidin Rejenere Selüloz Esaslı Lifler Üzerine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 605-611.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

K.Ş. Tunçel, 0000-0001-5095-6543

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	23.01.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	26.07.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	10.06.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: kemalsahintuncel@siirt.edu.tr, +90-484-212-1111

## 1. Giriş (Introduction)

Tekstil lifleri genellikle doğal ve sentetik lifler olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Rejenere selüloz lifleri ise, selüloz kaynaklı doğal maddelerden kimyasal yöntemler ile elde edilmektedir. En geniş kullanım alanına sahip olan selüloz kaynaklı rejenere lifler başta viskoz rayon olmak üzere lyocell ve modal lifleridir (Hockenberger, vd., 2008). Rejenere lifler, doğal liflere alternatif olarak 19. yüzyılın ortalarında başlayan araştırmalar neticesinde ortaya çıkmıştır. Kullanım alanları pamuk liflerinin kullanım alanlarıyla benzerlik göstermekle beraber ucuz olmaları nedeniyle giyimde, giysi aksesuarlarında ve ev tekstili alanlarında oldukça geniş bir yer tutmaktadır (Adanır, 2015).

Tekstil malzemeleri incelendiğinde en hızlı yanan malzemeler olarak ilk sırada giysilik kumaşlar bulunmaktadır. Giysilik kumaşlardan sonra yatak, döşemelik ve dekoratif kumaşlar bu sırayı takip etmektedir. (Bhatnagar, 1975; Özcan, 2002). Bu malzemelerin termal, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bilinmesi ve en uygun güç tutuşma tekniklerinden birinin kullanılması, yanma ve yangınlardan görülecek zararları minimize etmekte ve aynı zamanda bu ürünlerin tercih edilme olasılığını da arttırmaktadır (Özcan, vd., 2004).

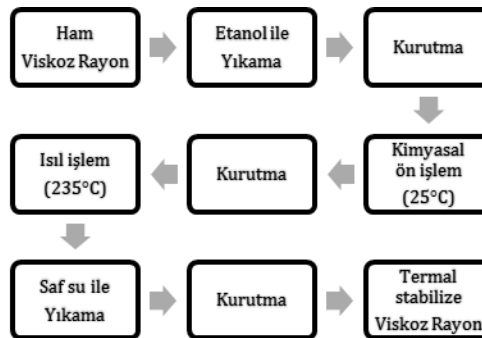
Viskoz rayon gibi selüloz esaslı liflerin güç tutuşurluğunda, di amonyum fosfat, amonyum sülfat, amonyum bromür, boraks, borik asit ve fosforik asit gibi ürünler kullanılmaktadır. Anorganik ürünlerin en büyük avantajı ucuz olmaları ve aynı zamanda düşük konsantrasyonlarda bile iyi bir güç tutuşurluk özelliği göstermeleridir (Tarakçıoğlu, 1994; Ömeroğulları ve Kut 2012). Rejenere selüloz lifleri aynı zamanda karbon lif üretiminde bir hammadde olarak da değerlendirilmektedir. Özellikle viskoz rayon lifleri bu anlamda aktif karbon olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Viskoz rayon liflerinden karbon lif üretimi 3 aşamadan oluşurken, özellikle karbonizasyon aşamasından önce gerçekleştirilen oksidasyon aşamasında da viskoz liflerinin termal stabilizasyonu sağlanmaktadır (Yaman, vd., 2006). Aktif karbon üretimi için, selüloz esaslı bu liflerin termal stabilizasyon aşamasında, amonyum klorür, alüminyum klorür, çinko klorür, demir III klorür, amonyum sülfat, borik asit ve fosforik asit gibi kimyasallar kullanılmakta (Bacon, vd., 1967; Sing, vd., 1987; Huidobro, vd., 2001; Su, vd., 2003; Zeng, vd., 2005; Yuhan, vd., 2008; Zeng ve Pan, 2008; Gül, 2014) ve genellikle 150°C ile 250°C arasındaki sıcaklıklarda stabilizasyon sıcaklığının etkisi incelenmektedir.

Bu çalışmanın amacı; fosforik asidin viskoz rayon liflerinin termal stabilizasyonu üzerindeki etkisini diğer çalışmalardan farklı olarak stabilizasyon sıcaklığının değil, stabilizasyon süresinin bir fonksiyonu olarak değerlendirmek ve viskoz rayonun iplik numarası, lif kalınlığı, yoğunluk, mukavemet ve termal özellikleri gibi fiziksel ve yapısal bazı özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemektir.

## 2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

### 2.1. Materyalin Hazırlanması (Preparation of Material)

Bu çalışmada kullanılan viskoz rayon ipliği 33.12 tex (1000 metre uzunluğundaki bir ipliğin gram cinsinden ağırlığı) iplik numarasına sahip olup 64 filament içermektedir. Lif kalınlığı ortalama olarak 23.66 µm'dir. Çalışmalar sırasında kullanılmış olan viskoz rayon lifleri öncelikle %5'lik etanol çözeltisi içerisinde 50°C'de yarım saat işlem görmüş ve liflerin üretimi sırasında maruz kalmış oldukları spin-finish yağlarının uzaklaştırılması sağlanmıştır. Etanol sonrasında su ile yapılan yıkama işlemlerinin ardından lifler etüv içerisinde 80°C'de 1 saat boyunca kurutulmuştur. Kimyasal emdirme işlemi 25°C'de viskoz rayon ipliklerinin %3'lük fosforik asit çözeltisi içerisinde 10 dakika boyunca daldırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Proses aşamaları Şekil 1' de gösterilmiştir.



Şekil 1. Proses aşamaları (Process stages)

Hazırlanan fosforik asit çözeltisinin işlem sıcaklığındaki pH değeri 1.70'dir. Kullanılan fosforik asit, %85'lik konsantrasyona sahip olup Kimetsan (Ankara) firmasından tedarik edilmiştir. Kimyasal emdirme işleminin

ardından çıkan numunelerin üzerindeki absorbe olmayan kimyasalın süzülmesinden sonra her bir numune 80°C'de 1 saat süreyle kurutulmuştur. Kurutulmuş olan numunelerin termal stabilizasyonu hava ortamında bir ısıtım işlem fırını içerisinde 235°C'de 10 - 20 - 30 ve 45 dakikalık sürelerde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleşmesi muhtemel olan fiziksel büzülme ve moleküler oryantasyon kaybını önlemek için iplikler paslanmaz çelik bir çubuk etrafına belirli bir gerginlikte sarılmıştır.

## 2.2. Verilerin Toplanması (Data Collection)

Ham ve kimyasal emdirme sonrasında ısıtım işlemi tabii tutulan viskoz rayon ipliklerinin yanıp yanmadığını gözlemlemek için bir çakmak testi uygulanmış ve iplikler yanana kadar bir çakmak alevine maruz bırakılmıştır. Alev karşısındaki durumlarına göre, ipliklerin yanıp yanmamasına bağlı olarak sonuç, başarılı veya başarısız olarak belirtilmiştir.

Stabilizasyon sıcaklık ve sürelerinin de etkisiyle liflerde bazı renk değişimleri (beyazdan-siyaha) meydana gelmiştir. Numunelerde ki bu renk değişimleri gözlemsel olarak ifade edilmiştir.

İplik numara ölçümleri; çevre uzunluğu 1 yarda (0,9144 metre) olan elektronik kontrollü ve motorlu Brustio marka bir çıkırcık kullanılarak gerçekleştirilmiş olup iplik numarası tex cinsinden hesaplanmıştır.

Lif kalınlığı ölçümleri; Olympus marka CX31 model bir optik mikroskop kullanılarak 5 ayrı geliş güzel seçilmiş filamentin lif eksenine boyunca 20 ayrı noktadan yapılmış olup elde edilen değerlerin ortalaması alınarak lif kalınlığı mikrometre ( $\mu\text{m}$ ) cinsinden hesaplanmıştır.

Yoğunluk ölçümleri; oda sıcaklığında Davenport marka çift kolonlu yoğunluk ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, hem herhangi bir işlem görmemiş viskoz rayon ipliğinin hem de kimyasal işlem sonrasında 235°C'de belirli sürelerde stabilize edilmiş viskoz rayon ipliklerinin yoğunluklarının belirlenmesi için, yoğunluk kolonu perkloretilen ( $1.62 \text{ g/cm}^3$ ) ve izopropil alkol ( $0.78 \text{ g/cm}^3$ ) karışımları ile hazırlanmıştır. Kolon kalibrasyonu yoğunluğu bilinen referans bilyeleri ile yapılmış olup numunelerin kolon içerisinde denge seviyelerine ulaşması için 24 saat bekletilmiştir. Elde edilmiş olan kalibrasyon grafiğinden yararlanarak yükseklik seviyesi ölçülen numunelerin, bu yükseklik değerlerine karşılık gelen yoğunlukları belirlenmiştir.

Diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ölçümleri; Seiko DSC-6200 Exstar 6000 modeli DSC cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için kullanılan numune ağırlığı yaklaşık olarak 4-5 miligramdır. Cihaz ısıtım hızı dakikada 10°C olup, üst sıcaklık noktası 400°C olarak belirlenmiştir. Isı akış kalibrasyonu için; indiyum ( $\Delta H=28.45 \text{ J/g}$ ), sıcaklık kalibrasyonu için; indiyum ( $T_m=156.6^\circ\text{C}$ ) ve çinko ( $T_m=419.51^\circ\text{C}$ ) standartları kullanılmıştır. Numuneler dakikada 50 mL'lik azot akış hızı altında test edilmiştir.

Mukavemet ölçümleri; Instron marka mukavemet test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler %50 çekme oranı, 25 mm çene mesafesi ve dakikada 12.5 mm çekme hızı kullanılarak yapılmıştır. Test sonucunda çekme mukavemeti (MPa), kopma uzama (%) cinslerinden olmak üzere 10 kopmanın ortalaması şeklinde hesaplanmıştır.

## 3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

### 3.1. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

%3'lük fosforik asit çözeltisiyle 25°C'de 10 dakika kimyasal işlem görmüş olan viskoz rayon liflerinin termal stabilizasyonu 10 ile 45 dakika arasındaki sürelerde 235°C'de gerçekleştirilmiştir. Ham ve fosforik asit emdirilmiş viskoz rayon liflerinin yanma davranışlarının karşılaştırılması için bir çakmak testi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 1'de gösterilmiştir. 235°C'de 10 ve 20 dakika ısıtım işlem gören viskoz rayon lifleri çakmak alevi karşısında yanmıştır. 30 dakika ısıtım işlem gören numune ise, çakmak alevine her ne kadar direnç gösterse de belirli bir süre sonra kısmen yanmıştır. 45 dakika ısıtım işlem görmüş olan numune çakmak testini başarı ile geçmiş ve yanmamıştır. Numunelerin yanma davranışları da açık bir şekilde gösteriyor ki 235°C'de 45 dakika ısıtım işlem gören numune termal açıdan stabilize edilmiştir. Aynı zamanda stabilizasyon sıcaklık ve sürelerinin de etkisiyle liflerde bazı renk değişimleri gözlenmiştir. Beyaz olan ham viskoz rayon liflerinin ısıtım işlemi sırasında fosforik asidinde etkisiyle renkleri kahve ve siyaha dönmüştür (Tablo 1). Viskoz rayon lifleri için numune renginin tam olarak siyahlaşmış olması termal açıdan stabilize olmuş bir yapının oluşumunun da bir göstergesi olabileceği düşünülmektedir.



**Tablo 1.** Stabilizasyon süresine bağlı olarak numunede meydana gelen renk değişimleri ve çakmak testi (Color changes occurring in the sample depending on the stabilization time and lighter test)

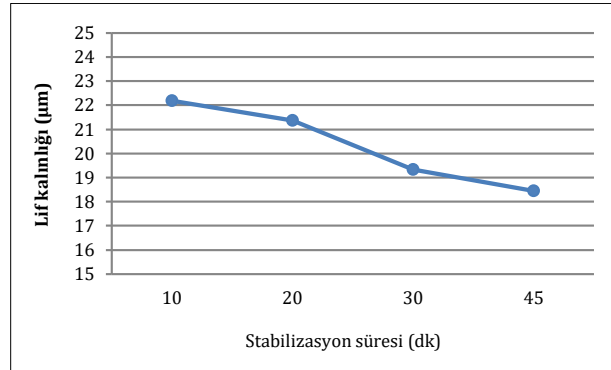
Stabilizasyon süresi (dk)	Renk değişimi	Çakmak testi
Ham	Beyaz	Başarısız
10	Kahve	Başarısız
20	Koyu kahve	Başarısız
30	Dalgali siyah	Kısmen Başarılı
45	Siyah	Başarılı

Viskoz rayon liflerinin stabilizasyon süresinin bir fonksiyonu olarak lif kalınlıklarında meydana gelen değişim Tablo 2 ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Stabilizasyon süresinin artmasıyla lif kalınlıkları değişmiş olmakla birlikte 235°C'de 45 dakika ısı işlem gören numunenin lif kalınlığı 23.66  $\mu\text{m}$ 'den 18.44  $\mu\text{m}$ 'ye azalmıştır.

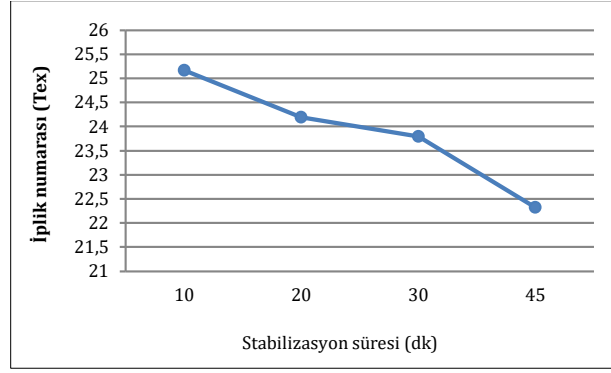
**Tablo 2.** Stabilizasyon süresine bağlı olarak numunenin lif kalınlığı ve iplik numarasında meydana gelen değişim (Change in fiber thickness and linear density of the sample depending on the stabilization time)

Stabilizasyon süresi (dk)	Lif kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Lif kalınlık kaybı (%)	İplik numarası (tex)	İplik numara kaybı (%)
Ham	23.66	0	33.12	0
10	22.18	6.25	25.17	24
20	21.36	9.72	24.19	26.96
30	19.34	18.25	23.79	28.17
45	18.44	22.06	22.32	32.61

Ham numune ile karşılaştırıldığında stabilizasyon süresine bağlı olarak lif kalınlığında yaklaşık olarak % 6 ile % 22 arasında bir kayıp söz konusudur. Lif kalınlığındaki bu azalma, stabilizasyon işlemleri sırasında meydana gelen reaksiyonlar sonucunda oluşan uçucu gazların ve su buharının yapıdan uzaklaşmış olmasından kaynaklanmaktadır (Soy, 2012).

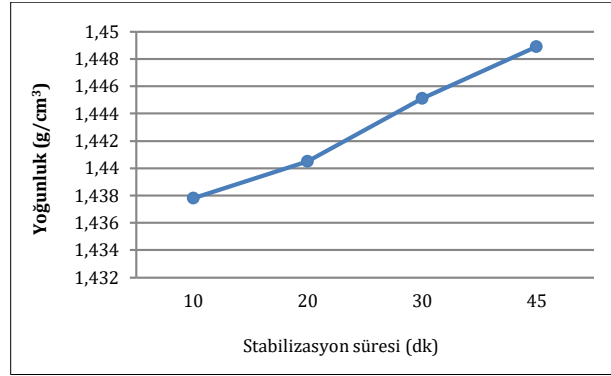
**Şekil 2.** Lif kalınlığında meydana gelen değişim (Change in fiber thickness)

Viskoz rayon liflerinin stabilizasyon süresinin bir fonksiyonu olarak iplik numaralarında meydana gelen değişim Tablo 2 ve Şekil 3'de gösterilmiştir. Stabilizasyon süresinin artması sonucu iplik numaraları değişmiş olmakla birlikte 235°C'de 45 dakika ısı işlem gören numunenin iplik numarası 33.12 tex'den 22.32 tex'e düşmüştür. Ham numune ile karşılaştırıldığında stabilizasyon süresine bağlı olarak iplik numarasında yaklaşık olarak % 24 ile % 32 arasında bir kayıp söz konusudur. İplik numarasındaki bu değişim, lif kalınlığındaki azalmayla benzer olup dehidasyon işlemleri sırasında meydana gelen su kaybından kaynaklanmaktadır (Soy, 2012).



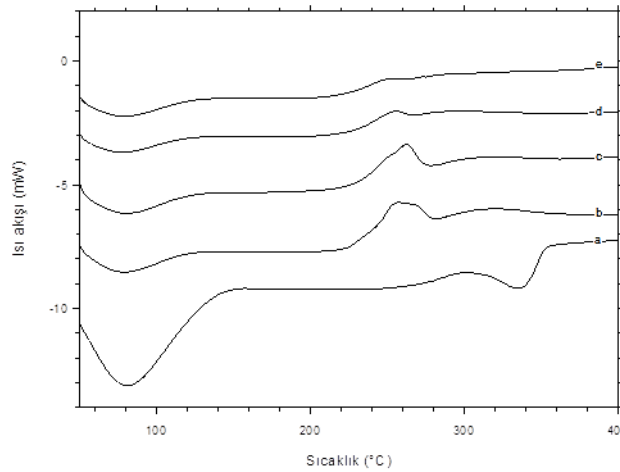
Şekil 3. İplik numarasında meydana gelen değişim (Change in linear density)

Viskoz rayon liflerinin stabilizasyon süresinin bir fonksiyonu olarak yoğunluklarında meydana gelen değişim Şekil 4'de gösterilmiştir. Sonuçlar açık bir şekilde göstermiştir ki, stabilizasyon süresinin artmasıyla viskoz rayon numunelerinin yoğunluk değerleri de artmıştır. Yoğunluk kolonu kullanılarak ham viskoz rayon lifinin yoğunluğu  $1.504 \text{ g/cm}^3$  olarak belirlenmiştir. Fosforik asit emdirilmiş ve ısıl işlem görmüş olan numunelerin yoğunlukları stabilizasyon süresinin de etkisiyle  $1.437 \text{ g/cm}^3$  ile  $1.449 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmektedir. Stabilizasyon süresiyle yoğunluk değerlerinde meydana gelen artış, moleküller arası çapraz bağlanmanın etkisiyle polimer zincirlerinin daha yakın bir paketlenme oluşturduğu şeklinde yorumlanmıştır (Takaku, vd., 1985).



Şekil 4. Yoğunlukta meydana gelen değişim (Change in density)

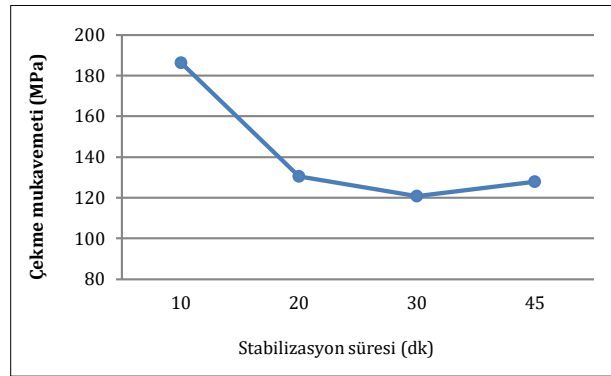
Ham ve fosforik asit ile işlem görüp termal açıdan stabilize edilen viskoz rayon liflerinin termal davranışlarının incelenmesi için DSC metodu kullanılmıştır. Ham ve stabilize edilmiş olan viskoz rayon liflerinin  $50^\circ\text{C}$  ile  $400^\circ\text{C}$  arasındaki DSC termogramları Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5.  $235^\circ\text{C}$ 'de farklı stabilizasyon sürelerine ait DSC termogramları a: ham viskoz rayon, b:10 dk, c:20 dk, d:30 dk, e:45 dk (DSC thermograms for different stabilization times at  $235^\circ\text{C}$  a: raw viscose rayon, b:10 min, c:20 min, d:30 min, e:45 min)

Rejenere selüloz liflerinin termal bozunma mekanizmasına bakıldığında iki ağırlık kaybı aşaması vardır. Bunlardan birincisi yavaş piroliz aşaması olarak adlandırılan suyun buharlaşması aşamasıdır. Diğeri ise, hızlı piroliz olarak adlandırılan selülozun dehidrasyonu ve bozunması aşamasıdır (Yeng, vd., 2015). Termogramda

100°C yakınlarında, viskoz rayon lifinin absorplamış olduğu nemden kaynaklı geniş bir endoterm pik gözükmektedir. Bütün DSC termogramlarında görülen bu endoterm 100°C'de absorplanan nemin buharlaşmasıyla kaybolmaktadır. Bu endotermi takiben yaklaşık olarak 305°C ile 354°C aralığında 334°C pik sıcaklığında yine geniş bir endoterm pik bulunmaktadır. Bu endoterm selülozun bozunma ve ayrışma ürünlerinin oluşmasına neden olan reaksiyonların bir sonucu olarak değerlendirilmiştir (Ciolacu, vd., 2011). Stabilize edilmiş olan numunelerin termogramlarında da açıkça gözükmektedir ki, bozunma endotermi fosforik asidinde etkisiyle 334°C'den 225°C'ye kadar kaymıştır. Dolayısıyla bozunma endoterminde 109°C kayma söz konusu olmuştur. Bilindiği üzere rejenere selüloz liflerinde kristal bölge oranı selüloz liflerine nazaran daha az olmakla birlikte %35-40 civarındadır (Özgüney, vd., 2006; Yaman, vd., 2007). Bozunma endoterminde görülen bu kayma, selüloz halkalarının hidroksil gruplarıyla fosfat grupları arasındaki reaksiyon sonucunda moleküller arası hidrojen bağlarının yok olması ve böylelikle selüloz kristal yapısının bozulmasıyla açıklanabilmektedir (Mwaikambo ve Ansell, 2002; Liu, vd., 2011; Miranda, vd., 2013). Bozunma endotermi altında kalan alan stabilizasyon süresinin artmasıyla azalmaktadır ki bu durum fosforik asidin viskoz rayon liflerinin termal davranışları üzerinde olumlu etkiler gösterdiğini kanıtlamaktadır. 10 ve 20 dakika stabilize edilmiş olan numunelerin termogramına bakıldığında yaklaşık 254°C'de ekzoterm bir pik görülmektedir. Bu ekzoterm pik, stabilizasyon süresinin artmasıyla 45 dakika stabilize edilmiş olan numunede neredeyse yok olmuştur. Bu ekzoterm pik, bozunma işlemleri sırasında selüloz zincirleri arasında oluşan çapraz bağlanma reaksiyonlarının bir sonucu olarak görülmektedir (Gündüz, 2012).



Şekil 6. Çekme mukavemetinde meydana gelen değişim (Change in tensile strength)

Stabilizasyon süresinin bir fonksiyonu olarak viskoz rayon liflerinin çekme mukavemetlerinde meydana gelen değişim Şekil 6'da gösterilmiştir. Ham viskoz rayon liflerinin çekme mukavemeti 342 MPa olarak hesaplanırken, kopma uzamaları da % 28 olarak bulunmuştur. Fosforik asit ile kimyasal ön işlem sonucunda 235°C'de 45 dakika stabilize edilen numunenin çekme mukavemeti 128 MPa ve kopma uzaması da % 6.23'dür. Kimyasal ön işlem ve sıcaklığın etkisiyle viskoz rayon ipliği kısmen esnekliğini kaybederek daha gevrek bir yapıya dönüşmüş ve kristal yapının bozulmasıyla çekme mukavemetini de kısmen kaybetmiştir. 10, 20 ve 30 dakikalık sürelerde stabilize edilen numunelerde, stabilizasyon süresinin artmasıyla birlikte çekme mukavemetinde bir düşüş olmasına rağmen diğer numunelere nazaran 45 dakika stabilize edilen numunenin çekme mukavemetinde ise bir miktar artış söz konusudur. Çekme mukavemetinde ki bu artış, zincirler arası çapraz bağların oluşmasının bir sonucu olarak da yorumlanabilmektedir (Gül, 2014).

#### 4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Ev tekstilinden endüstriyel ürünlere kadar birçok alanda kullanılan viskoz rayon lifleri, rejenere selüloz lifleri arasında en çok tercih edilen liflerden biridir. Termal özellikleri selüloz esaslı liflere benzer olmakla birlikte kolayca yanabilir olmalarından dolayı iyileştirilmeye muhtaçtır. Bu çalışmayla çeşitli karakterizasyon yöntemleri kullanılarak fosforik asidin viskoz rayon liflerinin fiziksel, yapısal ve termal özellikleri üzerindeki etkisi stabilizasyon süresinin bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Özellikle 235°C'de stabilizasyon süresinin artmasıyla birlikte iplik numarası, lif kalınlığı, kopma uzaması ve erime entalpisi değerleri azalırken yoğunluk değerlerinde ise bir artış gözlenmiştir. Bunun yanı sıra mukavemet değerleri 30 dakikalık stabilizasyon süresine kadar azalma gösterirken 45 dakikalık stabilizasyon işlemiyle kısmen artmıştır. Yapılan kimyasal işlem ve ısı işlemlerin ardından viskoz rayonun rengi beyazdan siyaha dönmüştür. Tüm bu yöntemler sonucunda fosforik asidin viskoz rayonun termal özelliklerine olumlu yönde bir katkı sağladığı görülmüştür. Özellikle aktif karbon olarak kullanılacak bir ürün olarak düşünüldüğünde stabilize olmuş olan viskoz rayon lifleri karbonizasyon aşamasına da hazır hale gelmiştir. Fakat mukavemet değerlerinin biraz daha iyileştirilmesi bu anlamda daha da değerli olacaktır.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Laboratuvar çalışmaları ve testler Erciyes Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nde yapılmıştır. Yazar vermiş oldukları desteklerden dolayı Tekstil Mühendisliği Bölümüne teşekkür eder.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

## Kaynaklar (References)

- Adanır, E.Ö., 2015. Tekstil Lifleri. 2. Baskı, Mungan Kavram Yayınevi.
- Bacon, R., Heights, B., Cranch, G.E., Moyer, R.O., Fostoria, Jr., Ohio, Watts, W.H., Lewiston., 1967. Process For Manufacturing Flexible Carbonaceous Textile Material. US Patent. No. 3305315.
- Bhatnagar, V.M., 1975. Flammability of Apparel. Progress In Fire Retardancy Series, 7, 15-20.
- Ciolacu, D., Ciolacu, F., Popa, V.I., 2011. Amorphous Cellulose Structure and Characterization. Cellulose Chemistry and Technology, 45 (1-2), 13-21.
- Gül, A., 2014. Selüloz Esaslı Karbon Lif Üretiminde Isıl Kararlılık ve Karbonizasyon Aşamalarının Yerine Getirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Gündüz, T., 2012. İnrümental Analiz. 11. Baskı. Gazi Kitabevi.
- Hockenberger, A., Güler, N., Mutlu, M., 2008. Plazma İşleminin Rejenere Selüloz Esaslı Liflerin Mekanik ve Yüzey Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 13 (2), 139-150.
- Huidobro, A., Pastor, A.C., Rodriguez-Reinoso, F., 2001. Preparation of Activated Carbon Cloth From Viscous Rayon Part IV. Chemical Activation. Carbon, 39, 389-398.
- Liu, Z., Wang, H., Li, Z., Lu, X., Zhang, X., Zhou, S., Zhou, K., 2011. Characterization Of The Regenerated Cellulose Films In Ionic Liquids And Rheological Properties Of The Solutions. Materials Chemistry and Physics. 128(1-2): 220-227.
- Miranda, M.I.G., Bica, C.I.D., Nachtigall, M.B., Rehman, N., Rosa, S.M.L., 2013. Kinetical Thermal Degradation Study of Maize Straw and Soybean Hull Celluloses by Simultaneous DSC-TGA and MDSC Techniques. Thermochimica Acta. 565: 65-71.
- Mwaikambo, L.Y., Ansell, M.P., 2002. Chemical Modification of Hemp, Sisal, Jute and Kapok Fibers by Alkalization. Journal of Applied Polymer Science, 84, 2222-2234.
- Ömeroğulları, Z., Kut, D., 2012. Tekstilde Güç Tutuşurluk. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17 (1), 27-41.
- Özcan, G., 2002. Örme Kumaş Yapısının Güç Tutuşma Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özcan, G., Dayıoğlu, H., Candan, C., 2004. Tekstilde Güç Tutuşma Teknikleri. Tekstil ve Teknik, Haziran sayısı, 318-329.
- Özgüney A.T., Körlü, A.E., Bahtiyari, M.İ., Bahar, M., 2006. Viskon Liflerinin Fiziksel Özellikleri ve Makromolekülerüstü Yapısı. Tekstil ve Konfeksiyon, 2, 100-104.
- Sing, K.S.W., Wycombe, H., Gimblett, F.G.R., Freeman, J.J., 1987. Manufacture of Fibrous Activated Carbons. US Patent. No. 4699896.
- Soy, T., 2012. Aktif Karbonizasyon Öncesi Selüloz Esaslı Tekstil Malzemelerinin Termal Kararlılığının Sağlanması ve Yapısal Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Su, C.I., Peng, C.C., Huang, P.H., Wang, C.H., 2003. Influence of Pretreatment on Physical Properties of Oxidized Rayon Fabrics. Textile Research Journal, 73 (5), 427-432.
- Takaku, A., Hashimoto, T., Miyoshi, T., 1985. Tensile Properties of Carbon Fibers From Acrylic Fibers Stabilized Under Isothermal Conditions. Journal of Applied Polymer Science, 30, 1565-1571.
- Tarakçıoğlu, I., 1994. Selüloz (Pamuk, Viskon) Liflerinden veya Bunların Poliester Lifleriyle Karışımlarından İmal Edilen Tekstil Mamullerinin Güç Tutuşurluk Bitim İşlemleri. Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi, 2, 310-317.
- Yaman, N., Öktem, T., Seventekin, N., 2006. Karbon Liflerinin Üretimi. Tekstil ve Konfeksiyon, 3, 164-173.
- Yaman, N., Öktem, T., Seventekin, N., 2007. Polinozik Liflerin Üretimi Özellikleri ve Kullanım Alanları. Tekstil ve Konfeksiyon, 3, 170-178.
- Yeng, L.C., Wahit, M.U., Othman, N., 2015. Thermal and Flexural Properties of Regenerated Cellulose (RC) / Poly (3-Hydroxybutyrate)(PHB) Bio composites. Jurnal Teknologi, 75 (11), 107-112.
- Yuhan, C., Qilin, W., Ning, P., Jinghua, G., Ding, P., 2008. Rayon-Based Activated Carbon Fibers Treated With Both Alkali Metal Salt and Lewis Acid. Microporous and Mesoporous Materials, 109, 138-146.
- Zeng, F., Pan, D., Pan, N., 2005. Choosing the Impregnants by Thermogravimetric Analysis For Preparing Rayon-Based Carbon Fibers. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 15 (2), 261-267.
- Zeng, F., Pan, D., 2008. The Structural Transitions of Rayon Under The Promotion of a Phosphate in The Preparation of ACF. Cellulose, 15, 91-99.



## KAPALI ALAN KONUMLANDIRMA SİSTEMLERİ İÇİN DÜĞÜM PROTOTİPİ GELİŞTİRME

İsmail KIRBAŞ<sup>1\*</sup>, Kadir ARSLAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye

<sup>2</sup> Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Wi-Fi, Bluetooth, Makine Öğrenmesi, Kapalı Alan Konumlandırma, Prototip Geliştirme.</i>	Kablosuz haberleşme sistemleri günümüzün en çok kullanılan ve hızla gelişen teknolojileri arasında bulunmaktadır. Kablosuz sistemlerdeki ve donanımsal malzemelerdeki gelişmeler ile düşük maliyetli, düşük enerji tüketimli ve kurulumları kolay kablosuz ağlar tasarlanarak bir ortamdaki farklı fiziksel veriler elde edilebilmektedir. Nesnelerin buldukları yerleri tespit etmek amacıyla kullanılan konumlandırma sistemleri, kablosuz teknolojileri kullanmaktadır. Günümüzde konumlandırma sistemlerinin kullanımı giderek artmakta ve yaygınlaşmaktadır. İlk olarak açık alanlarda konum belirlemek için kullanılan GPS uydu sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistem dünya genelinde askeri ve sivil uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Açık alan konumlandırma da genellikle uydu sinyallerinden faydalanılır ve sinyallerin geliş süresi üzerinden konum tespiti gerçekleştirilir. Ancak kapalı alanlar söz konusu olduğunda farklı bir yaklaşım ve çözüm geliştirilmesi gerekmektedir. Çalışmamızda kapalı alanlarda konum belirlemek amacıyla Wi-Fi ve Bluetooth sinyallerinden yararlanarak üç ayrı donanım geliştirilmiştir. Makine öğrenmesi yöntemleri kullanarak yapılan denemeler, kapalı alanda konum belirlemek için geliştirilen donanımların 1-1,5m aralığında bir hata ile konum tespiti yapabildiğini göstermektedir.

## DEVELOPING NODE PROTOTYPE FOR INDOOR POSITIONING SYSTEMS

Keywords	Abstract
<i>Wi-Fi, Bluetooth, Machine Learning, Indoor Positioning, Prototype Development.</i>	Wireless communication systems are among the most used and rapidly developing technologies of today. With the advances in wireless systems and hardware materials, different physical data in an environment can be obtained by designing low cost, low energy consumption and easy to install wireless networks. Positioning systems used to detect the locations of objects use wireless technologies. Today, the use of positioning systems is increasing and becoming widespread. Firstly, GPS satellite systems that are used to determine the location in open areas were developed. This system is widely used in military and civilian applications worldwide. In open field positioning, satellite signals are generally used and position determination is performed over the arrival time of the signals. However, when it comes to closed areas, a different approach and solution should be developed. In our study, three separate equipment using Wi-Fi and Bluetooth signals were developed to determine the location in closed areas. Experiments using machine learning methods show that the equipment developed to determine the location in the indoor area can detect locations with an error in the range of 1-1.5m.

### Alıntı / Cite

Kırbaş, İ., Arslan, K., (2020). Kapalı Alan Konumlandırma Sistemleri için Düğüm Prototipi Geliştirme, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 612-624.

\* İlgili yazar / Corresponding author: ismailkirbas@mehmetakif.edu.tr, +90-248-213-2751

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
İ. Kirbaş, 0000-0002-1206-8294	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	12.01.2020
K. Arslan, 0000-0002-9629-1839	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	22.05.2020
	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	06.06.2020
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Nesnelerin buldukları yerleri tespit etmek ve onları gerçek zamanlı olarak yönlendirmek için konumlandırma sistemleri kullanılmaktadır. Açık alanlarda bir nesnenin konumunu tespit edebilmek için GPS, GLONASS gibi uydu tabanlı konumlandırma sistemleri kullanılmaktadır. Uydu tabanlı sistemler ile nesnelerin gerçek konumunun tespit edilebilmesi için uydular ile konumu tespit edilecek nesne, görüş hattında olması gerekmektedir. Çatılar, duvarlar gibi uydu görüşünü engelleyen yapılardan dolayı uydu tabanlı konumlandırma sistemleri kapalı alanlarda kullanılamamaktadır (Başak, 2017). Bu nedenle kapalı alanlardaki nesnelerin konum tespiti için, uydu tabanlı sistemlerden bağımsız olarak, Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, UWB, RFID vb. tabanlı kablosuz teknolojiler kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Kapalı alanlar için henüz standartlaşmış bir konumlandırma sistemi olmamakla birlikte bir sitemden temel beklentiler; yüksek doğruluk, yüksek güvenlik, düşük maliyet, düşük güç tüketimi, düşük bakım ihtiyacıdır (Türkorall vd., 2016). Teknolojideki gelişmelerle birlikte kablosuz cihazlar daha ucuz ve daha düşük enerji tüketimli olarak üretilebilmektedir. Çalışmamız kapsamında kapalı alanlardaki nesnelerin konum tespiti için parmak izi konumlandırma yöntemini temel alan Wi-Fi ve Bluetooth (BLE) tabanlı donanımlar geliştirilmiştir. Bu amaçla konumlandırma yapılacak alana yerleştirilmek üzere düğüm cihazları, konumlandırma yapılacak alanın sinyal haritasını oluşturmak amacıyla saha analiz cihazı ve konumu tespit edilmek istenen nesneye takılacak olan kablosuz takip cihazı geliştirilmiştir. Geliştirilen tüm cihazlar istenildiği takdirde Wi-Fi veya Bluetooth moduna alınabilmektedir. Böylece hem Wi-Fi hem de Bluetooth tabanlı konumlandırma sistemi tek bir konumlandırma paketi kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir.

## 2. Kapalı Alan Konumlandırma (Indoor Positioning)

Radyo dalgaları, manyetik alanlar, akustik sinyaller, mobil cihazlar aracılığıyla toplanan sensör verileri kullanılarak kapalı bir alandaki nesnelere veya kişilerin konumlarının tespit edilmesi, kapalı alan konumlandırma olarak tanımlanmaktadır. Kapalı alan konumlandırma sistemleri hava alanları, tren istasyonları ve bina içlerinde yönlendirme yapmak, müzelerde ziyaretçi deneyimini artırmak, üretim ve depo sistemlerinde kontrolü sağlamak, görme engelliler için yönlendirme gibi uygulamalar ile kapalı alanlarda nesnelerin konumunu tespit etmek ve yönlendirmek amacıyla kullanılmaktadır (Dükkancı ve Kirbaş, 2018).

Kapalı alan içerisindeki nesnelerin konumlarını tespit edebilmek ve onları gerçek zamanlı olarak yönlendirebilmek için konumlandırma yapılacak alandaki sabit ve hareketli cihazlardan gelen sinyalleri elde etmek gerekmektedir. Bu nedenle sinyal ölçüm teknikleri kullanılmaktadır. Kapalı alan konumlandırma sistemlerinde kullanılan sinyal ölçüm teknikleri arasında geliş süresi, geliş süresi farkı, geliş açısı, gidiş-dönüş zamanı, alınan sinyal gücü göstergesi (RSSI) yaygın olarak kullanılan sinyal ölçüm teknikleridir. Konumlandırmanın yapılacağı kapalı alana, beklenen hassasiyete, maliyet ölçütlerine göre gereksinimleri karşılayabilecek ideal bir sistem tasarımı yapılması gerekmektedir (Arslan, 2019; Arslan ve Kirbaş, 2016).

Kapalı alan konumlandırma sistemleri farklı şekillerde tasarlanabilmektedir. Konumu bulunmak istenen nesnelere tarafından gönderilen sinyal bilgileri, konumu önceden bilinen sabit düğümler tarafından alınması ve bu cihazların gerekli hesaplama işlemlerini yapmasıyla konumlandırma yapılabileceği gibi konumu önceden bilinen sabit düğüm noktalarından alınan sinyallerin, konumu tespit edilmek istenen nesne tarafından alınmasıyla da konumlandırma yapılabilmektedir. Konumlandırma yapılacak tekniğe göre konumu önceden bilinen sabit cihaz ya da konumu bulunmak istenen nesne gerekli hesaplamaları kendisi yapabileceği gibi alınan sinyal özelliklerini merkezi bir cihaza göndererek konumlandırma hesaplarını merkezi cihaz da yapabilir (Kirbaş ve Dükkancı, 2019). RSSI tekniği, kapalı alan konumlandırma sistemlerinde nesnelerin konumlarının tespit etmek için sıklıkla kullanılan bir sinyal ölçüm tekniğidir. Wi-Fi, Bluetooth gibi birçok teknolojiye standart bir özellik olarak bulunan RSSI değeri, harici bir donanım gerektirmeden elde edilebilmektedir. Bu nedenle RSSI ölçüm tekniğine dayanan konumlandırma sistemleri zaman ve maliyet açısından kolaylık sağladığı için diğer sinyal ölçüm tekniklerine göre daha fazla tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen konumlandırma cihazları sinyal ölçümlerinde RSSI tekniğini kullanmaktadır.

Parmak izi yöntemi ise, eğitim aşaması ve konumlandırma aşaması olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Eğitim aşamasında kapalı alanın karakteristiğini oluşturan bir referans sinyal şiddet haritası oluşturulur (Kolodziej ve Hjelm, 2006; Yücel vd., 2014). Bu aşamada kapalı alan içerisindeki ızgara şeklinde belirli aralıkla referans noktalarına yerleştirilen sabit cihazlardan ölçümler alınır ve bu ölçümler bir sunucuya kaydedilerek eğitim aşaması tamamlanır. Bu işlemler saha analizi olarak adlandırılmaktadır. Konumlandırma aşamasında, konumu

bulunmak istenen cihaz ile referans noktalarına yerleştirilen cihazların sinyal şiddetleri ölçülür ve bu ölçümler saha analiz aşamasında sunucuya kaydedilen sinyal şiddeti haritasında hangi noktaya en yakın olduğu tespit edilerek konumlandırma yapılır. Açından ve mesafeden bağımsız olarak konumlandırma yapan parmak izi yöntemi ile gerçekleştirilen konumlandırma sistemlerinde, kapalı alanın karakteristiğini oluşturan eğitim aşamasında elde edilen sinyal sayısı ve sinyal yayan vericilerin sayısının artması konumlandırma doğruluğunu artırabilmektedir (Mautz, 2012; Sakpere vd., 2017). Ölçülen sinyallerin, eğitim aşamasında oluşturulan haritadaki sinyaller ile benzerlik analizi yapılırken konum tahmin doğruluğunu artırmak için yapay sinir ağları (YSA), K-en yakın komşu (K-EYK), Rassel orman gibi makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmaktadır. Wi-Fi ve Bluetooth cihazlarından RSSI değerleri kolaylıkla elde edilebildiğinden dolayı, kapalı alan konumlandırma sistemlerinde parmak izi yöntemi en sık kullanılan yöntemdir.

Parmak izi yönteminin eğitim aşaması olarak bilinen, çalışma alanının sinyal haritasının oluşturulması için statik ve dinamik tarama olmak üzere 2 farklı sinyal haritası oluşturma yöntemi bulunmaktadır. Dinamik taramada x ve y koordinatları girilmeden sürekli olarak saha içerisinde belirli bir hız ve doğrultuda hareket edilerek, tarama cihazı tarafından sabit düğümlerden alınan sinyal değerleri belirli aralıklarla sunucu cihaza gönderilmektedir. Daha sonra bu sinyal verilerine x ve y koordinatları eklenerek haritalama işlemi tamamlanır. Dinamik tarama çok geniş alanlarda kullanıldığında tarama süresini kısaltarak zaman tasarrufu sağlamaktadır. Statik taramada ise önceden belirlenen x ve y koordinatlarından sinyal verilerinin alınarak sunucu cihaza gönderilme işlemidir. Statik tarama işleminde bir noktadan birçok sinyal verisi elde edilerek daha doğru sonuçlara ulaşılabilir (Doğancı, 2008). Radyo dalgalarının yol kaybı, kapalı ve açık alanlarda alıcı ile verici arasındaki mesafenin artmasıyla birlikte logaritmik olarak artmaktadır. Yol kaybı alıcı ve verici arasındaki değişken mesafe ve yol kayıp katsayısı (n) cinsinden ifade edilmektedir. Logaritmik yol kayıp modeli Denklem 1'de gösterilmektedir.

$$P_L(dB) = P_L(d_0) + 10n \log(d/d_0) \quad (1)$$

d alıcı ve verici arasındaki mesafe, n yol kayıp katsayısıdır ve sinyalin yayıldığı ortama bağlıdır, d<sub>0</sub> daha önceden ölçümleri yapılmış bilinen referans uzaklıktır (Gu vd., 2009).

Literatür taramasında, Lashkari ve arkadaşları bir binadaki kişinin Wi-Fi sinyallerini kullanarak konum tespiti için mobil uygulama önermektedirler (Lashkari vd., 2010). Bekkelien Bluetooth tabanlı teknolojiler ile kapalı alan konumlandırma sistemi geliştirmiş ve 1.5 metre hata ile konum tespiti gerçekleştirmiştir (Bekkelien, 2012). Üçgenleme yöntemi ile Bluetooth Low Energy (BLE) tabanlı konumlandırma sistemi tasarlayan Salas, 1~1,5 metre hata ile konumlandırma gerçekleştirmiştir (Corbacho Salas, 2014). Taşkın akıllı telefon ile haberleşen BLE tabanlı konumlandırma sistemi geliştirmiş ve kapalı bir alanda konumlandırma testleri gerçekleştirmiştir (Taşkın, 2017). Michaelsson ve Quiroga kapalı bir çiftlik içerisinde testlerini gerçekleştirdikleri hayvan takip sisteminde enerji tüketimini optimize ederek ticari bir ürün geliştirmeyi amaçlamışlardır (Michaelsson ve Quiroga, 2017). Aydın ve Erkmen tasarladıkları donanım ile bir yayadan, hareket sensörleri ile elde ettikleri verileri kullanarak kişinin yürüdüğü yolu GUI ortamında çizdirmişlerdir (Aydın ve Erkmen, 2019).

### 3. Geliştirilen Kapalı Alan Konumlandırma Cihazları (Developed Indoor Positioning Devices)

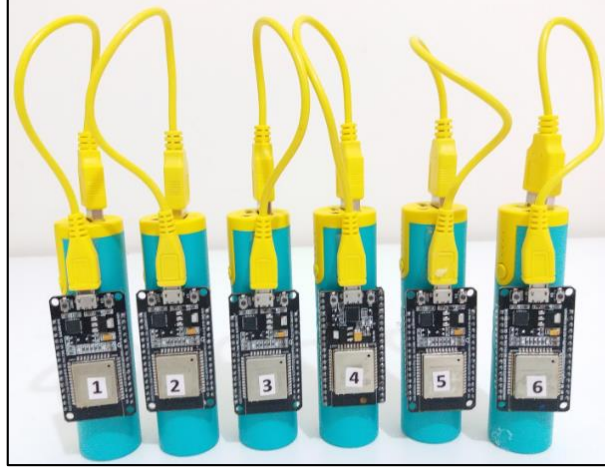
Çalışmamıza konu olan kapalı alan konumlandırma yaklaşımı Wi-Fi ve Bluetooth sinyallerinin gönderim kuvvetlerinin (RSSI) ölçüldüğü ve buna göre uzaklıkların kestirildiği bir yaklaşım olan parmak izi metoduna dayanmaktadır.

Bluetooth, kısa mesafelerde RF ile haberleşme sağlayan, IEEE 802.11.5 standartlarını kullanan bir haberleşme protokolüdür. Bluetooth teknolojisi lisanssız olarak kullanılan 2.4 GHz Endüstriyel, Bilimsel, Sağlık (ISM) bandında çalışmaktadır. 1994 yılında tasarlanan Bluetooth'un geliştirilmesi SIG kuruluşu tarafından sağlanmaktadır (Dahlgren ve Mahmood, 2014). Düşük güç tüketimine sahip ve fiyatları oldukça düşük olan Bluetooth cihazları, 2.4 GHz ile 2.48 GHz arasındaki 80 adet frekans bandını kullanabilmektedir. İlk Bluetooth haberleşme protokolü Bluetooth temel hız / geliştirilmiş veri hızı (BR/EDR) sistemi Bluetooth Classic olarak tanımlanmaktadır. 2010 yılında Bluetooth Low Energy (BLE) kullanıma sunulmuştur. Bilgisayarlar ve mobil cihazlar ile birlikte gömülü olarak gelen ve günlük hayatta sıklıkla kullanılan Bluetooth teknolojisinin en büyük avantajlarından biri düşük enerji tüketimidir. BLE teknolojisi ile birlikte Bluetooth cihazlarının kapsama alanları genişletilirken enerji tüketimleri azalmıştır.

Wi-Fi haberleşmenin temelleri ise IEEE tarafından 1980 yılında IEEE 802 komitesi oluşturulmasıyla atılmıştır (Kim ve Lee, 2015). Çalışmalar sonucunda kablosuz yerel alan ağı (WLAN) haberleşme protokolü geliştirilmiştir. WLAN sınırlı bir alanda, çift yönlü olarak 2.4 GHz ve 5 GHz radyo frekans bantlarını kullanarak geniş bantta veri iletimi sağlayan bir haberleşme protokolüdür (Bulucu ve Kavas, 2007). Wi-Fi teknolojisi de bilgisayarlar ve mobil cihazlar ile birlikte gömülü olarak gelmektedir. Bu teknolojinin, günümüzde her yerde kullanılması, geniş ürün

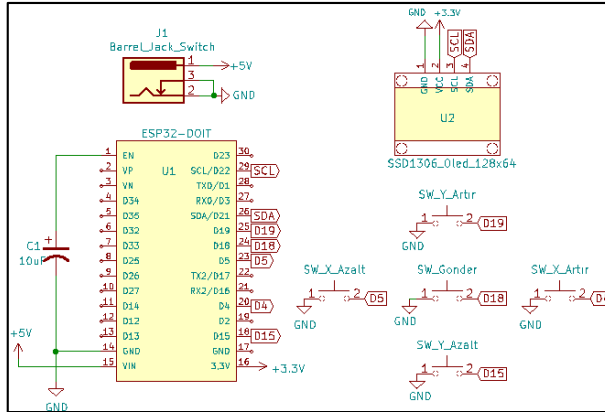
çeşitliliğine sahip olması, yüksek bağlantı hızlarına ulaşabilmesi ve internete doğrudan erişimi olması Wi-Fi teknolojisinin önemli avantajlarıdır.

Çalışma kapsamında Wi-Fi ve Bluetooth teknolojileri ile çalışabilen sabit düğüm cihazları, saha analiz cihazı ve kablosuz takip cihazı olmak üzere 3 farklı donanım geliştirilmiştir. Geliştirilen cihazlar içerisinde ESP32 modülünü barındırmaktadır. Bu cihazların ilki sabit düğüm cihazlarıdır. Sabit düğüm cihazları, her biri yeri değişmeyen erişim noktaları olarak sabit güçte BLE ve Wi-Fi yayın yapmaktadırlar. Şekil 1’de sabit düğümler gösterilmektedir.



Şekil 1. Çalışma alanına yerleştirilen sabit düğümler (Fixed nodes placed in the work area)

Kapalı alandaki her noktanın yüksek bir kesinlikle bilenebilmesi için ikinci olarak saha analiz cihazı geliştirilmiştir. Saha analiz cihazı da ESP32 modülü içermektedir ve üzerinde butonlar ve bir adet OLED ekran yer almaktadır. Kapalı alan içerisinde konum belirlemek amacıyla öncelikle saha analiz cihazı kullanılmalıdır. Saha analiz cihazına mevcut olarak bulunulan konum metre cinsinden x ve y koordinatı olarak butonlar vasıtasıyla tanımlanır ve ölçüm butonuna basıldığında sabit düğümlerden alınan sinyallerin RSSI değerleri bir bilgisayara gönderilir. Böylece bulunulan konum ve RSSI değerleri kapalı alan içerisindeki her bir konum için toplanarak bilgisayar üzerinde kayıt altına alınmış olur. Bu teknik genel olarak parmak izi yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2’de tasarlanan saha analiz cihazının şematik çizimi yer almaktadır.



Şekil 2. Tasarlanan saha analiz cihazının şematik çizimi (Schematic drawing of the designed field analyzer)

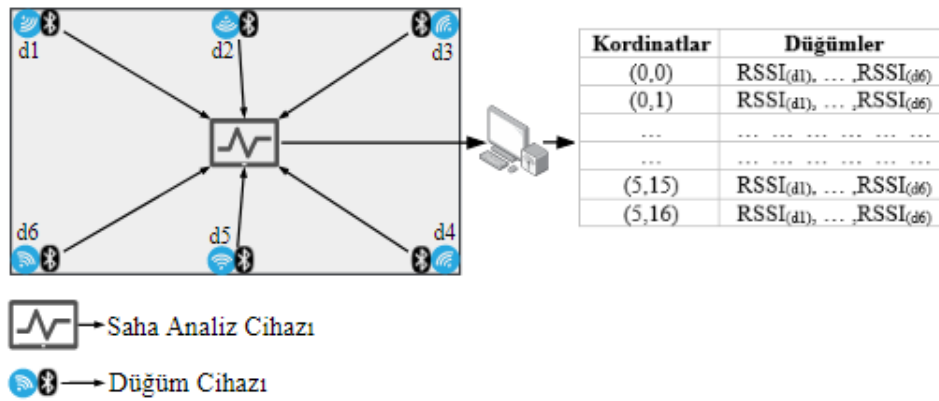
Şekil 2’de şematik çizimi gösterilen saha analiz cihazı, elektronik devre şeması ve baskı devre kartı tasarım programı olan açık kaynak kodlu KiCad programı kullanılarak çizilmiştir. Baskı devre ve kodlama işlemleri yapılan saha analiz cihazı Şekil 3’de gösterilmektedir.

Şekil 4’te 6 adet düğüm cihazının çalışma alanına yerleştirilmesi ve saha analiz cihazı ile RSSI değerlerinin ölçümü gösterilmektedir.





Şekil 3. Geliştirilen saha analiz cihazı (Developed field analyzer)



Şekil 4. Düğüm cihazlarının çalışma alanına yerleştirilmesi ve saha analiz çalışması (Placement of node devices in the work area and field analysis study)

Son olarak kapalı alan içerisinde konumu bulunmak istenen nesnelere tespit etmek için kablosuz takip cihazı geliştirilmiştir. Çevrimdışı safhada, çalışma alanındaki düğümlerden RSSI değerleri elde edilerek çalışma alanının sinyal şiddet haritası oluşturulduktan sonra çalışma alanındaki yapılacak üçüncü ve son işlem kapalı alan içerisindeki konumu bulunmak istenen nesneye bağlanan kablosuz takip cihazı ile düğümlerden yayılan RSSI verilerini almak ve bunları bilgisayara göndermektir. Şekil 5'de bu amaçla geliştirilen kablosuz takip cihazı gösterilmektedir.



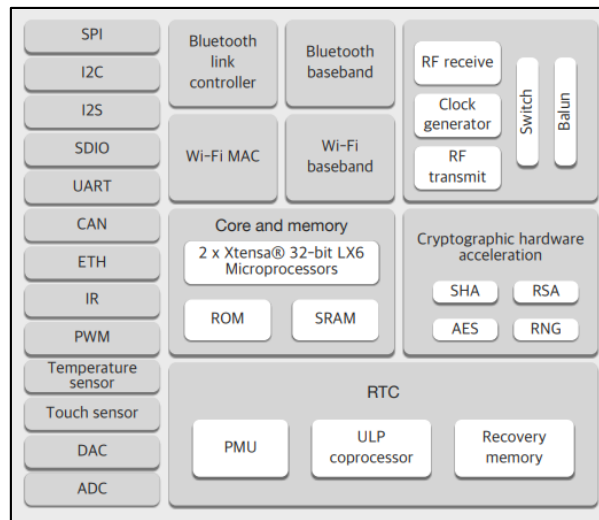
Şekil 5. Geliştirilen kablosuz takip cihazı (Developed wireless tracking device)

Kablosuz takip cihazı ortamdaki RSSI verilerini bilgisayara gönderir. Bilgisayar, daha önce modellenen çalışma alanının sinyal şiddet haritası ile kablosuz takip cihazından gelen verileri yapay zekâ yöntemleri ile işleyerek hareketli nesnenin konum tespitini gerçekleştirir. Şekil 6'da geliştirilen donanımların tümünde yer alan ESP32 modülü gösterilmektedir.



Şekil 6. ESP32 modülü (ESP32 Module)

ESP32 modülü içerisinde ESP32-D0WDQ6 entegresini barındırmaktadır. Bu entegre SoC (System on Chip) olarak tasarlanmıştır. Tek entegre üzerinde Tensilica Xtensa 32-bit çift çekirdekli LX6 CPU, 2.4 GHz Wi-Fi Bluetooth Classic ve Bluetooth Low Energy (BLE) teknolojilerini barındıran, çok çeşitli uygulamalarda kullanılacak, farklı güç seçenekleri sunan programlanabilir bir modüldür. Şekil 7'de ESP32 modülünün blok diyagramı gösterilmektedir (Espressif, 2019).



Şekil 7. ESP32-D0WDQ6 blok diyagramı (ESP32-D0WDQ6 block diagram)

ESP32 modülü, esnek bir Wi-Fi kullanımı sunmaktadır. Özellikleri aşağıdaki gibidir. Erişim noktası (EN) olarak çalışarak bir ağ kurabilir, İstasyon (STA) olarak çalışarak bir ağa bağlanabilir ve EN+STA olarak çalışarak hem bir ağ kurup hem de farklı bir ağa bağlanabilir. Ayrıca Wi-Fi Direct özelliği ile daha hızlı dosya paylaşımına olanak sağlar. WPS özelliği ile hızlı bir şekilde şifresiz olarak bağlantı kurulabilir. Bluetooth Low Energy (BLE) ve Bluetooth Classic bağlantı özellikleri ile IoT (Internet of Things) projelerinde çok yönlü olarak kullanılabilir. Tablo 1'de ESP32 modülüne ait enerji tüketim değerleri gösterilmektedir.

Tablo 1. ESP32 modülü güç tüketim değerleri (ESP32 power consumption values)

ÇALIŞMA MODU	ENERJİ TÜKETİMİ
Çalışma voltajı	3.3 v
Modem uyku modu	3-20 mA
Derin uyku modu	10 $\mu$ A
Wi-Fi Tx paket 13dBm-21dBm	160-260 mA
Wi-Fi / Bt Tx paket 0 dBm	120 mA
Wi-Fi / Bt Rx ve dinleme	80-90 mA

Elektrik ile doğrudan bağlantının olmadığı ve modülün harici pil ile çalıştığı alanlarda enerji tüketimi büyük önem arz etmektedir. ESP32 kartının aktif mod, modem uyku modu, hafif uyku modu, derin uyku modu, bekleme modu olmak üzere 5 farklı güç modu bulunmaktadır. Cihaz farklı güç modları kullanılarak çok düşük güç tüketimi ile uzun süre kullanılabilir.

#### 4. Konumlandırma Çalışması ve Kullanılan Makine Öğrenmesi Yöntemleri (Positioning Study and Machine Learning Methods Used)

Geliştirilen konumlandırma cihazları ile 21 metreye 7.5 metrelik bir alanda çalışma yapılmıştır. Toplamda 102 noktadan 510 veri elde edilmiş ve bu veriler K-EYK ve YSA ile eğitilerek konum tahminleri gerçekleştirilmiştir.

##### 4.1. K-En Yakın Komşu Algoritması (K-Nearest Neighbor Algorithm)

K-en yakın komşu (K-EYK) sınıflandırma algoritması, belirli özelliklerine göre sınıflandırılmış bir örnek veri kümesine, sınıfı bilinmeyen yeni bir veri geldiğinde, yeni veriyi küme içerisindeki kendisine en yakın K tane veriye bakarak sınıflandırma işlemi yapan bir makine öğrenme algoritmasıdır. K-EYK algoritmasında sınıflandırma işlemleri komşu sayısını ifade eden K parametresine göre yapılmaktadır. K 1 ise örnek veri en yakın komşunun sınıfına atanırken K sayısı veri setindeki örnek sayısına doğru yaklaştıkça dikkate alınan komşu sayısı da artmakta ve oylamaya göre seçim yapılmaktadır (Taşcı ve Onan, 2016).

K-EYK algoritmalarında birçok uzaklık ölçütü kullanılmaktadır. Bunlar arasında Öklid uzaklık, sınıflandırma işlemlerinde en sık kullanılan mesafe ölçüm yöntemidir. Öklid iki nokta arasındaki doğrusal uzaklığı hesaplamak için kullanılan bir matematiksel yöntemdir.  $x_i$  ve  $y_i$  bilinen iki nokta ve  $d$  uzaklık olmak üzere Öklid uzaklık hesabı Denklem (2)'de gösterilmektedir.

$$d = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

$n$  Boyutlu iki nokta arasındaki farkların mutlak değerler toplamını ifade eden Manhattan yöntemi Denklem (3)'de gösterilmektedir.

$$d = \sum_{i=0}^n |x_i - y_i| \quad (3)$$

Chebyshev uzaklığı (en büyük değer uzaklığı), Minkowski uzaklığının  $n \rightarrow \infty$  olduğu özel durumdur ve iki nokta arasındaki farkların mutlak değerlerinin en büyüğü olarak ifade edilmektedir (Taşcı ve Onan, 2016). Denklem (4) Chebyshev uzaklığını göstermektedir.

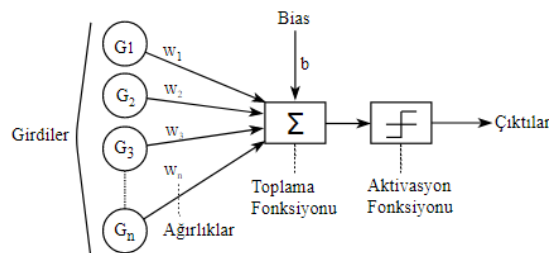
$$d = \max(|x_i - y_i|) \quad (4)$$

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen konum tahminlerinde, K-EYK sınıflandırma algoritması kullanılarak parmak izi yönteminin doğruluğunun artırılması hedeflenmiştir. Kullanılan diğer makine öğrenmesi yöntemi ise Yapay Sinir Ağlarıdır.

##### 4.2. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)

Yapay zekâ alanının alt dallarından olan yapay sinir ağları (YSA), öğrenebilen sistemlerin temelini oluşturmaktadır. İnsan beynindeki nöronlara benzer şekilde çalışan YSA öğrenme, hatırlama ve yeni bilgiler oluşturma gibi işlevleri yapabilen yazılımlardır (Yurtoğlu, 2005). YSA regresyon, kümeleme, tahmin, sınıflandırma ve optimizasyon gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Yılmaz ve Küçükşille, 2014; Bozkurt vd., 2014).

Bir YSA; yapay sinir hücreleri (nöron), hücreler arasındaki bağlantılar ve öğrenme algoritması olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. YSA'nın temel elemanları olan nöronlar, sistemi etkileyen faktörlere göre bir veya daha fazla girdi alarak problemde istenen sonuç adedi kadar çıktı oluştururlar. Nöronlar bir araya gelerek YSA oluştururlar (Kırbaş, 2018; Salam ve Keskin, 2018). YSA'nın eğitilebilmesi için nöronların ağırlık değerlerinin belirli kurallar dâhilinde değiştirilebilir olması gerekmektedir. Bilgiler tüm ağda yayılmış şekilde tutulurlar ve nöronlar üzerindeki bilgiler tek başlarına anlam taşımazlar çünkü olay tüm ağ tarafından öğrenilir (Öğücü, 2006). Ağdaki tüm nöronların en ideal ağırlık değerlerini almasıyla öğrenme işlemi tamamlanmış olur. Şekil 8'de yapay sinir hücresinin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 8. Yapay sinir hücresi (Artificial Neural cell)

Çalışma alanından elde edilen sinyal verileri ile YSA eğitmek için MATLAB programı kullanılmıştır. Ağın eğitim için Levenberd-Marquardt öğrenme algoritması kullanılarak veriler %70 eğitim, %15 doğrulama, %15 sınav verisi olmak üzere rastgele bölümlere ayrılmıştır. Levenberd-Marquardt yöntemi hesaplanan hata değerine göre nöron ağırlıklarını yenileyerek en az hata değerini elde eden bir öğrenme algoritmasıdır (Gödekoğlu, 2019). Yapay sinir hücrelerinde birleştirme fonksiyonu için toplama fonksiyonu (5) kullanılmıştır. Gizli katmandaki yapay sinir hücrelerinde hiperbolik tanjant (6), çıktı katmanındaki yapay sinir hücrelerinde doğrusal fonksiyon (7) kullanılmıştır.

$$T = \sum_{i=1}^n G_i W_i \quad (5)$$

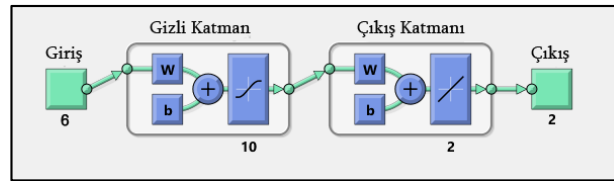
$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (6)$$

$$f(x) = x \quad (7)$$

$x$  ve  $y$  gerçek konumlar  $\hat{x}$  ve  $\hat{y}$ , ise tahmin edilen konumlar olmak üzere modellenen YSA performansını ölçmek için Denklem 8'de gösterilmekte olan ortalama kare hatası (MSE) yöntemi kullanılmıştır.

$$MSE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=0}^n (\sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2}) \quad (8)$$

Wi-Fi ve Bluetooth sistemleri için YSA modeli Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Yapay Sinir Ağı modeli (Artificial Neural Network model)

Şekil 9'da gösterilmekte olan YSA modeli için girişte çalışma alanındaki 6 düğüm noktasına ait 6 nöron, gizli katmanda 10 nöron ve çıkışta  $x$  ve  $y$  koordinatları için 2 nöron bulunmaktadır.

## 5. Araştırma Bulguları (Research Findings)

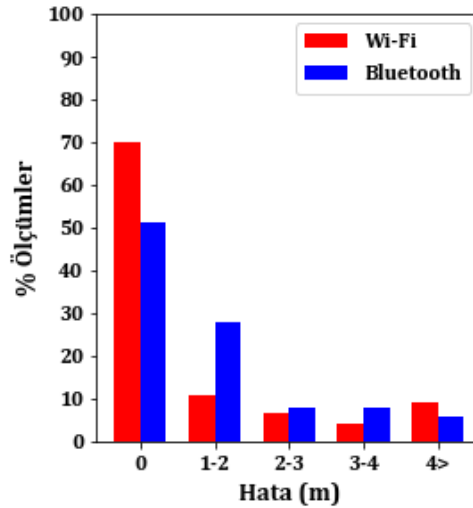
K-EYK algoritması kullanılarak Wi-Fi ve Bluetooth teknolojileri ile gerçekleştirilen konumlandırma işlemlerinde Manhattan, Öklid, Chebyshev uzaklık hesaplama metotları için  $K$  değeri 1 ile 5 arasında sırayla değiştirilerek konum tahminleri gerçekleştirilmiştir. Bu konum tahminleri için yüzde doğruluk sonuçları Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. K-EYK Sınıflandırma ile Wi-Fi ve Bluetooth sistemlerinin konum tahminlerinin yüzde doğruluk sonuçları (Percentage accuracy of location estimates of K-NN Classification and Wi-Fi and Bluetooth systems)

Teknoloji	Algoritma	K sayısı				
		1	2	3	4	5
Wi-Fi	Öklid	% 68,6	% 60,3	% 58,5	% 58,5	% 50,3
	Manhattan	<u>% 69,8</u>	% 61	% 59,7	% 61,5	% 54,4
	Chebyshev	% 61,5	% 54,4	% 49,1	% 49,1	% 47,9
Bluetooth	Öklid	% 47,9	% 40,2	% 38,5	% 34,3	% 31,4
	Manhattan	<u>% 50,9</u>	% 41,4	% 41,4	% 36,1	% 34,3
	Chebyshev	% 43,2	% 30,8	% 30,2	% 29	% 23

Tablo 2'deki sonuçlara göre, hem Wi-Fi hem de Bluetooth sistemi için en yüksek doğrulukta konum tahminleri, komşu sayısını belirleyen  $K$  değerlerinin 1 olarak alındığı Manhattan uzaklık yöntemi ile hesaplanmıştır. Wi-Fi sistemi ile % 69,8 oranında doğru sınıflandırma yapılırken, Bluetooth sistemi ile % 50,9 oranında doğru

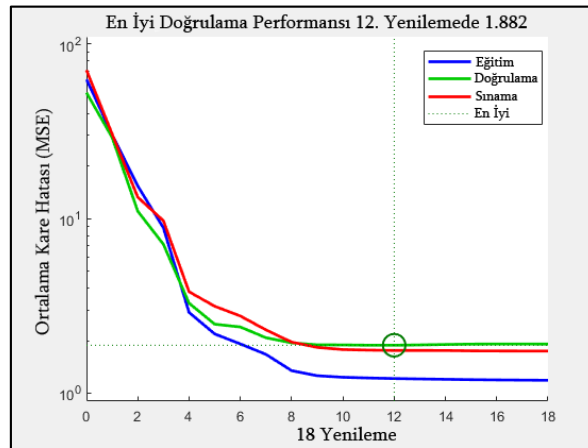
sınıflandırma yapılmıştır. Şekil 10'da Manhattan uzaklık yöntemi ile tespit edilen konumlara ait yüzde hata oranları grafiksel olarak gösterilmektedir.



**Şekil 10.** K-EYK Sınıflandırması ile Wi-Fi ve Bluetooth konumlandırma yüzde hata grafiği (K-NN Classification with Wi-Fi and Bluetooth positioning percentage error graphic)

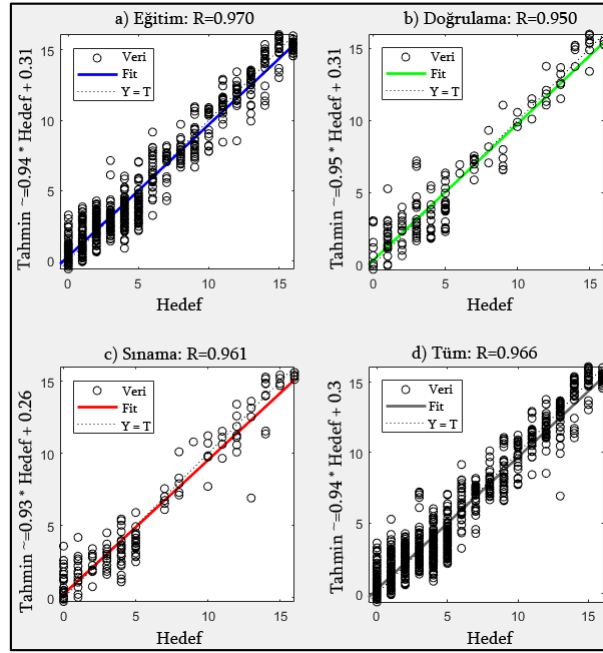
Şekil 10'daki grafikte Hata (m) eksenini, hedef konum ile tahmin edilen konum arasındaki hatayı metre bazında gösterirken, % Ölçümler eksenini tüm ölçüm sonuçlarının yüzdelik oranlarını göstermektedir. Wi-Fi sistemi için % 69.8 doğru sınıflandırma metre bazında değerlendirildiğinde hata ortalaması 0,94 metre hesaplanmıştır. Bluetooth sistemi için % 50,9 oranındaki doğru sınıflandırma metre bazında değerlendirildiğinde hata ortalaması 1,1 metre hesaplanmıştır.

YSA kullanılarak gerçekleştirilen konum tahmin işlemlerinde Wi-Fi sistemi için Eğitim, doğrulama ve sınamaya verilerinin logaritmik olarak MSE değerlerini gösteren YSA performans grafiği Şekil 11'de gösterilmektedir.



**Şekil 11.** Wi-Fi YSA eğitim, doğrulama ve sınamaya performans grafiği (Wi-Fi ANN training, verification and testing performance graph)

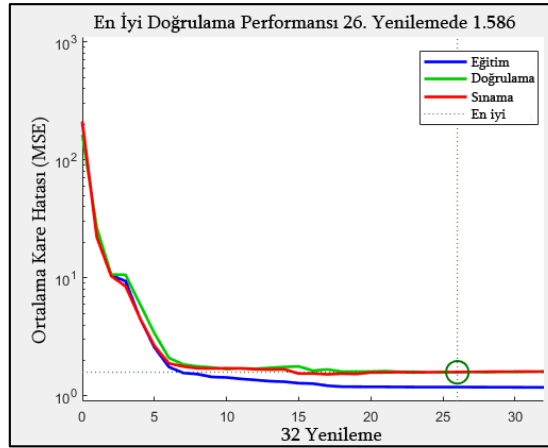
Şekil 11'deki grafik incelendiğinde eğitim, doğrulama ve sınamaya verilerinin birbirine yakın seyir izlediği dolayısıyla ağıın genelleme kabiliyetinin iyi olduğu görülmektedir. En düşük MSE değeri 1,882 olarak 12. yenilemede elde edilmiş ve 18 kez yenilenen ağda 12. yenilemeden sonra anlamlı bir değişiklik görülmemiştir. Şekil 12'de Wi-Fi sisteminin R değerleri eğitim, doğrulama ve sınamaya verileri için sistemin başarı oranını göstermektedir.



Şekil 12. Wi-Fi YSA regresyon analizi (Wi-Fi ANN regression analysis)

Şekil 12’de gösterilen grafikler incelendiğinde eğitim, doğrulama ve sınama verileri için R değerlerinin birbirine yakın bulunduğu dolayısıyla ağın ezber yapmadığı anlaşılmaktadır. Eğitilen ağın genel başarı grafiğinin yer aldığı Şekil 12.d incelendiğinde R değeri % 96,6 olarak hesaplanmıştır.

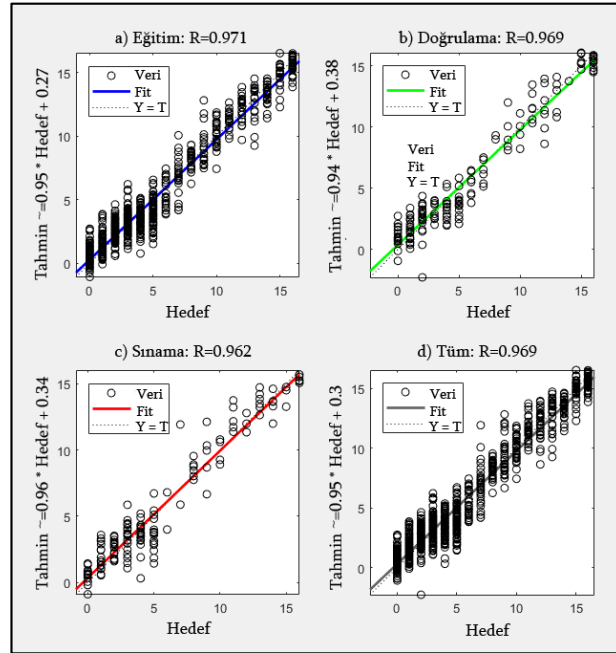
Yine YSA kullanılarak gerçekleştirilen konum tahmin işlemlerinde Bluetooth sistemi için Eğitim, doğrulama ve sınama verilerinin logaritmik olarak MSE değerlerini gösteren YSA performans grafiği Şekil 13’de gösterilmektedir.



Şekil 13. Bluetooth YSA eğitim, doğrulama ve sınama performans grafiği (Bluetooth ANN training, verification and testing performance graph)

Şekil 13 incelendiğinde en düşük MSE değeri 1,586 olarak 26. yenilemede elde edilmiş ve 32 kez yenilenen ağda 26. yenilemeden sonra anlamlı bir değişiklik görülmemiştir.

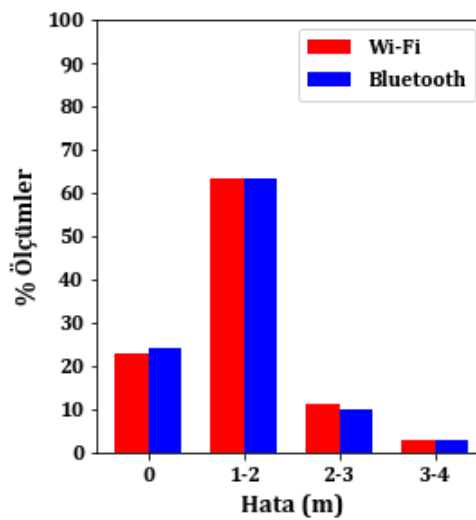
Şekil 14’de Bluetooth sisteminin R değerleri eğitim, doğrulama ve sınama verileri için sistemin başarı oranını göstermektedir. Şekil 14’deki grafiklerde eğitilen ağın genel başarı grafiğini gösteren Şekil 14.d incelendiğinde R değeri % 96,9 olarak hesaplanmıştır. Şekil 15’de Wi-Fi ve Bluetooth sistemlerine ait yüzde hata oranları grafiksel olarak gösterilmektedir.



Şekil 14. Bluetooth YSA regresyon analizi (Bluetooth ANN regression analysis)

Tablo 3. YSA eğitiminin başarı ve hata değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of success and error values of ANN education)

Teknoloji	Değerler	Örnek sayısı	MSE	R
Wi-Fi	Eğitim	356	1,188	0,971
	Doğrulama	77	1,586	0,969
	Sınama	77	1,596	0,962
Bluetooth	Eğitim	356	1,213	0,970
	Doğrulama	77	1,882	0,950
	Sınama	77	1,756	0,961



Şekil 15. YSA ile Wi-Fi ve Bluetooth konumlandırma yüzde hata grafiği (ANN with Wi-Fi and Bluetooth positioning percentage error graphic)

Şekil 15'te metre bazında hata değerleri gösterilirken, YSA ile Wi-Fi ile gerçekleştirilen konum tahminlerinde ortalama 1,51 metre, Bluetooth ile gerçekleştirilen konum tahminlerinde ortalama 1,48 metre hata ile konum tespitleri gerçekleştirilmiştir.

## 6. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Kapalı alan konumlandırma sistemleri gelişmekte olan bir teknolojidir. Çalışma kapsamında kapalı alan konumlandırma sistemlerinde kullanılmak üzere ESP32 modülü üzerine kurulu olarak 3 farklı donanım geliştirilmiştir. Donanımlardan ilki sabit düğüm olarak adlandırılmaktadır ve erişim noktası olarak görev yapmaktadır. İkinci donanım, kapalı alandaki sabit erişim noktalarının belli bir noktadaki RSSI sinyal güçlerini ölçebilen ve elde ettiği değerleri bir bilgisayara aktarabilen saha analiz cihazıdır. Geliştirilen son donanım ise takip edilip konumu belirlenmek istenen nesneye yerleştirilecek olan enerji kaynağı olarak bir adet Li-Po batarya kullanan kablosuz takip cihazıdır. Bu cihaz da yine sabit erişim noktalarının yaydıkları sinyal güçlerini ölçerek bir bilgisayara aktarmakta ve böylece konumun hesaplanmasını sağlamaktadır. Geliştirilen üç cihaz da Wi-Fi ve BLE olarak kullanılabilir. Konum tespitinde K-EYK ve YSA teknikleri kullanılarak konumlandırma hatasının en aza indirgenebilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan teknolojiye ve yapay zekâ tekniğine bağlı olarak konum tespitinin değiştiği gözlenmiştir. K-EYK algoritması kullanıldığında Wi-Fi ve Bluetooth sistemleri için ~1 metre hatalı konum tespiti yapılmıştır. YSA algoritması kullanımında ise Wi-Fi ve Bluetooth sistemleri için ~1.5 metre hatalı konum tespiti yapılmıştır. Literatür incelendiğinde de, RSSI tabanlı konumlandırma sistemleri için metreler mertebesinde hatalı hesaplamaların yapıldığı görülmüştür. Sinyal ölçümlerinde, konum değiştirilmediğinde dahi RSSI değerlerinde sapmalar olduğu tespit edilmiştir. Bu durum hatalı konum belirlemelerine sebep olmaktadır. Bunun temel sebebi ucuz bir yöntem olan RSSI ölçümünün sağlıklı olarak yapılamaması olabilir. Literatürde Wi-Fi veya Bluetooth tabanlı sistemler ile kapalı alanlarda konum tespit çalışmalarına sıklıkla rastlanırken hem Wi-Fi hem de Bluetooth tabanlı olarak çalışabilen konumlandırma sistemi geliştirilmesi ve çalışmada kullanılan cihazların özel olarak tasarlanması çalışmanın özgün taraflarıdır. İlerleyen zamanlarda elde edilen verilerin en az hatayla değerlendirilmesine yönelik çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Abu Salam, Z., Keskin M. E. (2018). Yapay Sinir Ağları ile Dibis Barajı'nın Seviye Tahmini. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 6(4), 564 – 569.
- Arslan, K. (2019). Yapay Zekâ Teknikleri ile Wi-Fi ve Bluetooth Tabanlı Kapalı Alan Konumlandırma Sistemi Geliştirilmesi. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi.
- Arslan, K., Kirbaş, İ. (2016). Nesnelerin İnterneti Uygulamaları İçin Algılayıcı/Eyleyici Kablosuz Düğüm İlkörneği Geliştirme. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7(Özel 1), 35-43.
- Aydin, H., Erkmen, B. (2019). Kapalı Alan Yaya Konumlandırma Sistemi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(2), 337-344.
- Başak, A.A. (2017). Izgara Tabanlı Parmak İzi Algoritmalarıyla Kapalı Alan Konumlandırma Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi.
- Bekkelien, A. (2012). Bluetooth Indoor Positioning, Master of Computer Science. Geneva Üniversitesi, İsviçre.
- Bulucu, U., Kavas, A. (2007). Kablosuz Ağ Kapsaması için YSA(Yapay sinir Ağ) Modeli Kullanılarak Propagasyon Kayıplarının Hesaplanması.
- Corbacho Salas, A. (2014). Indoor Positioning System based on Bluetooth Low Energy, A Degree's Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Dahlgren, E., Mahmood, H. (2014). Evaluation of indoor positioning based on Bluetooth Smart technology. Yüksek Lisans Tezi. Chalmers Teknoloji Üniversitesi. İsveç.
- Doğancı, Y. U. (2008). 802.11 Standartlarını Kullanarak Pozisyon Tespiti. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi.
- Dükkancı, A., Kirbaş, İ. (2018). Designing a web based data acquisition system for battery-powered wireless sensor nodes: WiFiLab. IV International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS), 1, 439-447. <http://www.icens.eu>
- Espressif, S. (2019). ESP32 Series Datasheet. [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf) (Erişim Tarihi 02.01.2020).
- Gödekoğlu, D. A. (2019). Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Solunum Fonksiyon Testleri ile Cinsiyet, Obezite e Sigara Kullanımının İlişkilendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Gu, Y., Lo, A., Niemegeers, I. (2009). A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. IEEE Communications Surveys Tutorials, 11(1), 13-32. <https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090103>
- Kirbaş, İ. (2018). İstatistiksel metotlar ve yapay sinir ağları kullanarak kısa dönem çok adımlı rüzgâr hızı tahmini. SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1-1. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.305224>
- Kirbaş, İ., Dükkancı, A. (2019). Development of A Wi-Fi Based Indoor Location System Using Artificial Intelligence Techniques. 2(1), 5.
- Kim, J., Lee, I. (2015). 802.11 WLAN: history and new enabling MIMO techniques for next generation standards. IEEE Communications Magazine, 53(3), 134-140. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7060495>
- Kolodziej, K. W., Hjelm, J. (t.y.). Local Positioning Systems: LBS Applications and Services. 62.



- Lashkari, A. H., Parhizkar, B., Ngan, M. N. A. (2010). WIFI-Based Indoor Positioning System. 2010 Second International Conference on Computer and Network Technology, 76-78. <https://doi.org/10.1109/ICCNT.2010.33>
- Mautz, R. (2012). Indoor positioning technologies. <http://hdl.handle.net/20.500.11850/54888>
- Michaelsson, L., Quiroga, S. (2017). Design and Evaluation of An Adaptive Dairy Cow Indoor Positioning System, Master of Science Thesis. KTH Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management, İsveç.
- Öğücü, Müh. M. O. (2006). Yapay Sinir Ağları ile Sistem Tanıma. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Sakpere, W., Oshin, M. A., Mlitwa, N. (2017). A State-of-the-Art Survey of Indoor Positioning and Navigation Systems and Technologies. South African Computer Journal, 29(3). <http://sacj.cs.uct.ac.za/index.php/sacj/article/view/452>
- Taşcı, E., Onan, A. (2016). K-En Yakın Komşu Algoritması Parametrelerinin Sınıflandırma Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Akademik Bilişim.
- Taşkın, D. (2017). Design of Bluetooth Low Energy Based Indoor Positioning System. Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, 60-65. <https://doi.org/10.17694/bajece.334388>
- Türkorall, T., Tamer, Ö., Yetiş, S., İnanç, E., Çetin, L., (2016). Alınan İşaret Güç Göstergesi (RSSI) Metriği Kullanılarak Kapalı Alan Mesafe Kestirimi, Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı
- Algorithm (SBA) For Trainin Feed-Forward Neural Network. 20th International Conference on Soft Computing.
- Yılmaz, S., Küçüksille, E. U. (2014). Strengthened Bat Algorithm (SBA) For Trainin Feed-Forward Neural Network. 20th International Conference on Soft Computing.
- Yurtoğlu, H. (2005). Yapay Sinir Ağları Metodolojisi ile Öngörü Modellemesi: Bazı Makroekonomik Değişkenler İçin Türkiye Örneği.
- Yücel, H., Yazıcı, A., ve Edizkan, R. (2014). A survey of indoor localization systems. 2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU).



## INFLUENCE OF RARE EARTH SUBSTITUTION ON THE MAGNETIC PROPERTIES OF SPINEL FERRITES

Ayşe DEMİR KORKMAZ\*

Department of Chemistry, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Istanbul Medeniyet University, Uskudar, Istanbul, Turkey

### Keywords

*Magnetic Nanoparticles,  
Rare Earth Substitution,  
Spinel Ferrites.*

### Abstract

Nano-size ferrites (NSF) are magnetic nanoparticles (MNPs) which have attracted great interest in the last decades owing to their high surface area-to-volume ratio, high saturation magnetization, initial permeability, etc. Nickel-copper-zinc ferrites are especially used in multi-layer chip inductors (MLCIs) which are found in mobile phones, camcorders, notebook computers, etc. MLCIs are composed of alternating layers of silver electrodes and soft ferrites. Thus, it is important to develop magnetic characteristics in ferrites for requiring less ferrite layers and hence to obtain further miniaturized devices. The goal of our study is to investigate the effect of rare earth substitution of Ni-Cu-Zn ferrite nanoparticles. Ni-Cu-Zn NSFs substituted with rare earth metal (RE) ions  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ , and  $\text{Dy}^{3+}$  in varying concentrations were obtained by a sonochemical method. We investigated the crystal structure, chemical bonding, morphology and magnetic characteristics of the Ni-Cu-Zn NSFs by X-ray powder diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM), and vibrating sample magnetometry (VSM), respectively. The phase purity of the samples was confirmed by the XRD analysis. Stretching vibrations of spinel ferrites were verified by the FT-IR analysis. VSM results reveal that the rare earth substitution has a significant effect on the magnetic properties of the Ni-Cu-Zn NSFs.

## NADİR TOPRAK KATKISININ SPİNEL FERRİTLERİN MANYETİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

### Anahtar Kelimeler

*Manyetik Nanoparçacıklar,  
Nadir Toprak Katkısı,  
Spinel Ferritler.*

### Öz

Nano boyutlu ferritler (NSF), yüksek yüzey alanı-hacim oranı, yüksek doyumluk mıknatıslanması, başlangıç manyetik geçirgenliği, vb. özellikleriyle son yıllarda büyük ilgi çeken manyetik nanoparçacıklardır (MNP). Nikel-bakır-çinko ferritler ise özellikle cep telefonlarında, video kameralarda, dizüstü bilgisayarlarda vs. bulunan çok katmanlı yonga indüktörlerinde (MLCI'lar) kullanılmaktadır. MLCI'ler alternatif gümüş elektrot ve yumuşak ferrit katmanlarından oluşur. Bu nedenle, daha az ferrit katmanı gerektiren ve dolayısıyla daha da küçültülmüş cihazların elde edilmesi için ferritlerde manyetik özelliklerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Çalışmamızın amacı, Ni-Cu-Zn ferrit nanoparçacıklarına nadir toprak katkısının etkilerini araştırmaktır. Çeşitli konsantrasyonlarda nadir toprak metal (RE) iyonları  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  ve  $\text{Dy}^{3+}$  ile katılanmış Ni-Cu-Zn NSF'ler bir sonokimyasal yöntemle elde edildi. Ni-Cu-Zn NSF'lerin kristal yapısını, kimyasal bağını, morfolojisini ve manyetik özelliklerini sırasıyla X-ışını toz kırınımı (XRD), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve titreşimli numune manyetometrisi (VSM) ile inceledik. Numunelerin faz saflığı, XRD analizi ile doğrulandı. Spinel ferritlerin gerilme titreşimleri FT-IR analizi ile doğrulandı. VSM sonuçları, nadir toprak süstitüsyonunun Ni-Cu-Zn NSF'lerin manyetik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

\* İlgili yazar / Corresponding author: ayse.demir@medeniyet.edu.tr, +90-216-280-3449

**Alıntı / Cite**

Demir Korkmaz, A., (2020). Influence of Rare Earth Substitution on the Magnetic Properties of Spinel Ferrites, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 8(2), 625-634.

**Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)**

A. Demir Korkmaz, 0000-0002-3102-7201

**Makale Süreci / Article Process**

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	11.02.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	10.06.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	21.06.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

**1. Introduction**

Magnetic nanoparticles (MNPs) are nano-sized ferrites which have attracted great interest in the last decades and there is an increase in their use in various fields. Nano-sized spinel ferrites (NSFs) are a class of MNPs with superior magnetic and electrical properties such as high saturation magnetization, initial permeability, low eddy current loss, and high dielectric properties. Main uses of ferrite nanoparticles (NPs) ranging from biomedical applications to environmental and industrial applications include drug delivery, biomedical imaging (magnetic resonance imaging (MRI)), magnetic hyperthermia (Sharifi et al., 2012; Umut et al., 2019), catalysis (Dantas et al., 2013; Taghavi Fardood et al., 2017), wastewater treatment (Fu et al., 2010), capacitors (Khan et al., 2017), circulators (Harris and Sokolov, 2019), multilayer chip inductors (MLCIs) (Batoov and Ansari, 2012), etc. MLCIs, which are produced by alternating silver and Ni-Cu-Zn ferrite layers, are widely used in the telecommunication industry as well as electronics such as mobile phones, camcorders, and notebook computers. Therefore, the development of properties of Ni-Cu-Zn ferrites is essential for further miniaturizing such devices.

The magnetic, optical, and electrical properties of NSFs can be varied by introducing different cations in the spinel structure,  $AB_2O_4$ , where "A" represents tetrahedral sites and "B" represents octahedral sites. A spinel ferrite cell consists of 64 tetrahedral (Td) sites and 32 octahedral (Oh) sites occupied by 8 cations and 16 cations, respectively. Since the magnetic moment of the NSF is the difference between the magnetizations of two sub-lattices ( $M = M_A - M_B$ ), the cation distribution within these sites can alter magnetic properties of NSF although they have the same composition and size. Therefore, many attempts have been made to obtain Ni-Cu-Zn ferrites with novel characteristics by the incorporation of different cations to the available positions in the crystal structure. The rare earth substitution in NCZF was also studied by some researchers. For example, Gabal et al. investigated the effect of lanthanum ion incorporation in NCZF prepared by using egg white. There was a rise in the size-dependent coercivity and lattice constant whereas a drop was observed for Curie temperature in  $La^{3+}$  substituted Ni-Cu-Zn ferrites (Gabal et al., 2011).

To the best of our knowledge, there are no studies comparing the effect of doping NCZF with europium, terbium, and dysprosium. Therefore, we report the preparation of  $Ni_{0.4}Cu_{0.2}Zn_{0.4}RE_{0.02}Fe_{1.98}O_4$  ( $RE = Eu^{3+}, Tb^{3+}, Dy^{3+}$ ) NSFs via sonochemical approach and discuss the structural and magnetic properties of RE-doped NCZF by XRD, FT-IR, and VSM measurements.

**2. Experimental**

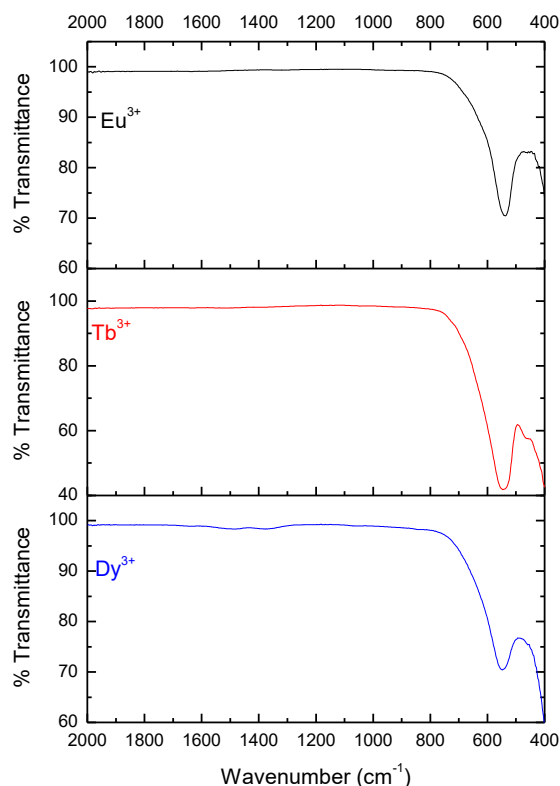
The ultrasonic-induced cavitation is a sonochemical method in which a liquid is compressed and expanded suddenly by the help of ultrasound. The rapid expansion of the cavitation bubbles is followed by their collapse which is repeated for several cycles, reaching extremely high temperatures ( $\sim 5000$  K), high pressures (20 MPa) and a fast cooling rate ( $\sim 10^6$  K per second) (Goswami et al., 2013). This technique offers a shorter reaction time, the hydrolysis rate is highly enhanced, and it is possible to prepare uniformly distributed and highly pure NPs (Ahmed et al., 2015).

The synthesis of  $Ni_{0.4}Cu_{0.2}Zn_{0.4}RE_{0.02}Fe_{1.98}O_4$  NSFs was achieved by a sonochemical approach. Stoichiometric amounts of metal precursors;  $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ,  $Cu(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ,  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  and RE (III) oxide ( $RE = Eu^{3+}, Tb^{3+}, Dy^{3+}$ ) were dissolved in 80 ml of deionized water + 15 ml of concentrated hydrochloric acid solution under vigorous stirring followed by adjusting the pH to 11 by using ammonia solution. The solution was exposed to ultrasonic irradiation with high-intensity (20 kHz frequency and 70 W power, (UZ SONOPULS HD 2070)) for 30 min. The powder product was obtained by washing with a mixture of DI  $H_2O$ /EtOH (50% v/v), centrifugation and drying at 100 °C for 3 h.

**3. Results and Discussion**

Fourier transform-infrared (FT-IR, Bruker) spectra were recorded using a spectrometer over the wavelength range 4000–400  $cm^{-1}$ . The FT-IR spectra of  $Ni_{0.4}Cu_{0.2}Zn_{0.4}RE_{0.02}Fe_{1.98}O_4$  spinel ferrites are presented in Fig. 1. Two

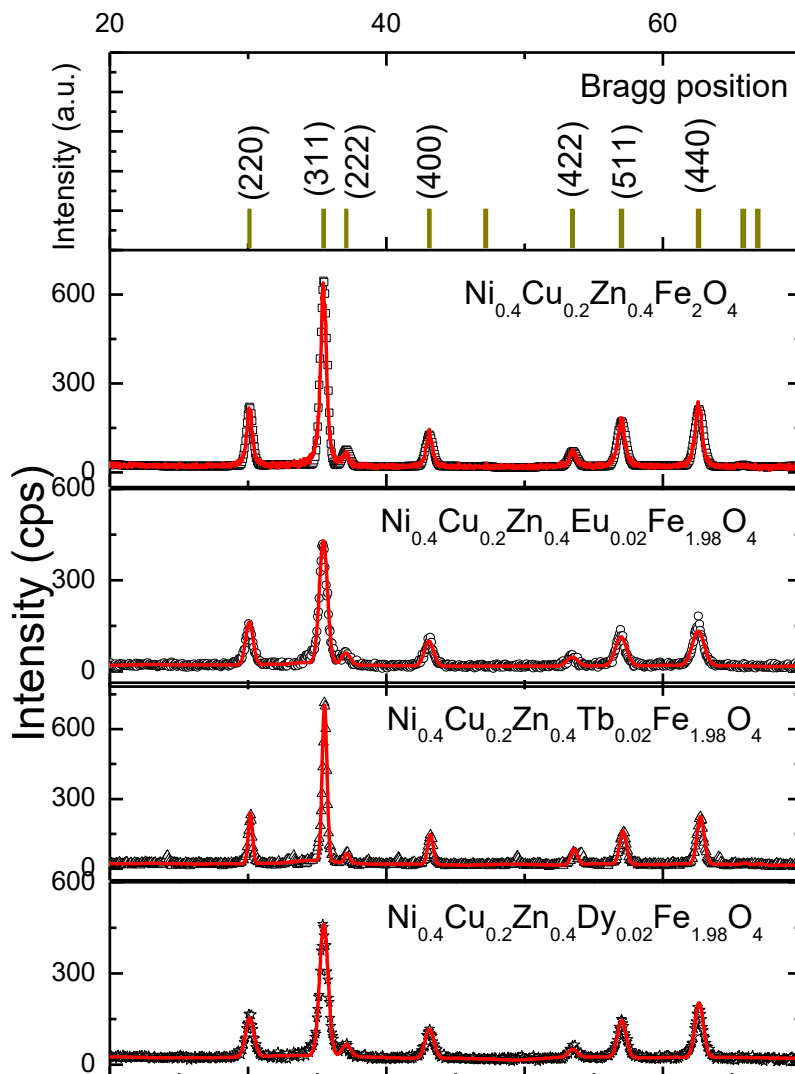
characteristic vibration bands of spinel ferrites are presented around  $550\text{ cm}^{-1}$  and  $400\text{ cm}^{-1}$  that are assigned to the vibrational bands  $\nu_1$  and  $\nu_2$  of tetrahedral (A-site) and octahedral (B-site) lattices, respectively. The wavenumbers for the  $\nu_1$  band are  $538$ ,  $547$ , and  $550\text{ cm}^{-1}$  for  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ -substituted NCZF nanoparticles, respectively. The cation distribution among A- and B-sites designates the absorption band positions for  $\nu_1$  and  $\nu_2$  vibrations (Ahmad et al., 2018).  $\nu_1$  around  $550\text{ cm}^{-1}$  indicates the stretching band of the metal-oxygen at the tetrahedral site ( $\text{M}_{\text{tetra}}\text{-O}$ ) and  $\nu_2$  band around  $450\text{ cm}^{-1}$  is due to the metal-oxygen stretching at the octahedral site ( $\text{M}_{\text{octa}}\text{-O}$ ) (Kesavamoorthi and Raja, 2017; Slimani et al., 2019). It is clear that the  $\nu_1$  vibrational band shifts to a higher frequency as the ionic radius of the substituent ion changes (Harzali et al., 2018). This is due to the distortion of the crystal structure and occupation of B-sites by the rare earth substituent ions causing a change in the bond length and hence the frequency of the absorption band (Almessiere et al., 2019a; Ansari et al., 2018).



**Figure 1.** FT-IR spectra of  $\text{Ni}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.4}\text{RE}_{0.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$  NSFs.

### 3.1. XRD Analysis

Figure 2 displays the XRD patterns of  $\text{Ni}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.4}\text{RE}_{0.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$  NSFs. The diffraction peaks associated with the Bragg's reflections from  $(2\ 2\ 0)$ ,  $(3\ 1\ 1)$ ,  $(4\ 0\ 0)$ ,  $(2\ 2\ 2)$ ,  $(4\ 0\ 0)$ ,  $(4\ 2\ 2)$ ,  $(4\ 4\ 0)$  exhibit the typical crystal structure of spinel ferrites with a space group  $\text{Fd-}3\text{m}$ . We would like to note that the single phase of RE substitution in Ni-Cu-Zn ferrite is achieved by using only the sonochemical method without further calcination. Rietveld refinement was used to calculate the structural parameters from XRD patterns with FullProf program. Average crystallite sizes were determined by Debye-Scherrer equation by using the most intense  $(3\ 1\ 1)$  peak of each sample. The refined structural parameters and crystallite sizes of the products are listed in Table 1. The lattice constant ( $a$ ) slightly decreases with  $\text{RE}^{3+}$  substitution. This indicates that the larger trivalent rare earth ions were successfully incorporated into octahedral sites replacing the  $\text{Fe}^{3+}$  ions in the unit cell (Jacob et al., 2013). The crystallite sizes are found to be between 13 and 22 nm. In general, since the rare earth ions are compared to the ferric ion, the crystallite size tends to rise as the ionic radius of the  $\text{RE}^{3+}$  increases. On the other hand, the sample doped with dysprosium ion showed the minimum value in the crystallite size. This may be attributed to the formation of a secondary phase. In other samples, the crystallite size tends to decrease as the atomic number increases.



**Figure 2.** XRD powder patterns of  $\text{Ni}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$  and  $\text{Ni}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.4}\text{RE}_{0.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$  ( $\text{RE}=\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ , or  $\text{Dy}^{3+}$ ) NSFs. The open symbols correspond to the experimental data and the solid red lines represent the fitted curves.

**Table 1.** The rare earth ion content, and refined structural parameters for  $\text{Ni}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$  and  $\text{Ni}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.4}\text{RE}_{0.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$  NSFs Fd-3m (No. 227) where RE is a trivalent rare earth ion ( $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ , or  $\text{Dy}^{3+}$ ).  $a$ : Lattice constant,  $V$ : volume,  $D_{\text{XRD}}$ : crystallite size,  $r_{\text{M}^{3+}}$ : ionic radius of the trivalent metal ion (M).

Trivalent ion ( $\text{M}^{3+}$ )	$a$ (Å)	$V$ (Å) <sup>3</sup>	$D_{\text{XRD}}$ (nm) ±0.08	$\chi^2$ ( $\text{chi}^2$ )	$R_{\text{Bragg}}$	$r_{\text{M}^{3+}}$ (Å)
$\text{Fe}^{3+}$ (unsubstituted)	8.392(5)	591.13	17.19	1.71	5.15	0.645
$\text{Eu}^{3+}$	8.378(6)	588.18	18.20	1.92	3.08	0.947
$\text{Tb}^{3+}$	8.379(7)	588.41	22.54	1.99	2.80	0.923
$\text{Dy}^{3+}$	8.391(5)	590.90	13.54	1.20	1.31	0.912

### 3.2. TEM and SEM Analyses

The morphology, the size and the electron diffraction patterns of RE substituted Ni-Cu-Zn NSF were investigated by a scanning electron microscope (SEM; FEI Titan ST) coupled with EDX system and transmission electron microscopy (TEM) (FEI, Morgagni 268). The TEM was used at an accelerating voltage of 80 kV. TEM images, histograms and selected area electron diffraction (SAED) patterns of  $\text{Ni}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.4}\text{RE}_{0.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$  spinel ferrites are displayed in the following figure. The particles exhibited cube-like morphology and aggregated due to their magnetic nature. The average size of the particles was estimated around 20 nm for the NSFs. The particle size estimated by TEM was in good agreement with the crystallite size calculated by the XRD analysis (Table 1). Rare earth cation substituted nickel-copper-zinc NSF exhibited isolated continuous rings in their diffraction patterns (SAED) which were recorded by TEM. The first six rings of the SAED patterns were identified as, (220), (311), (400), (422), (511) and (440). The (311) displayed the maximum diffraction intensity which is consistent with the XRD pattern as shown by Figure 3.

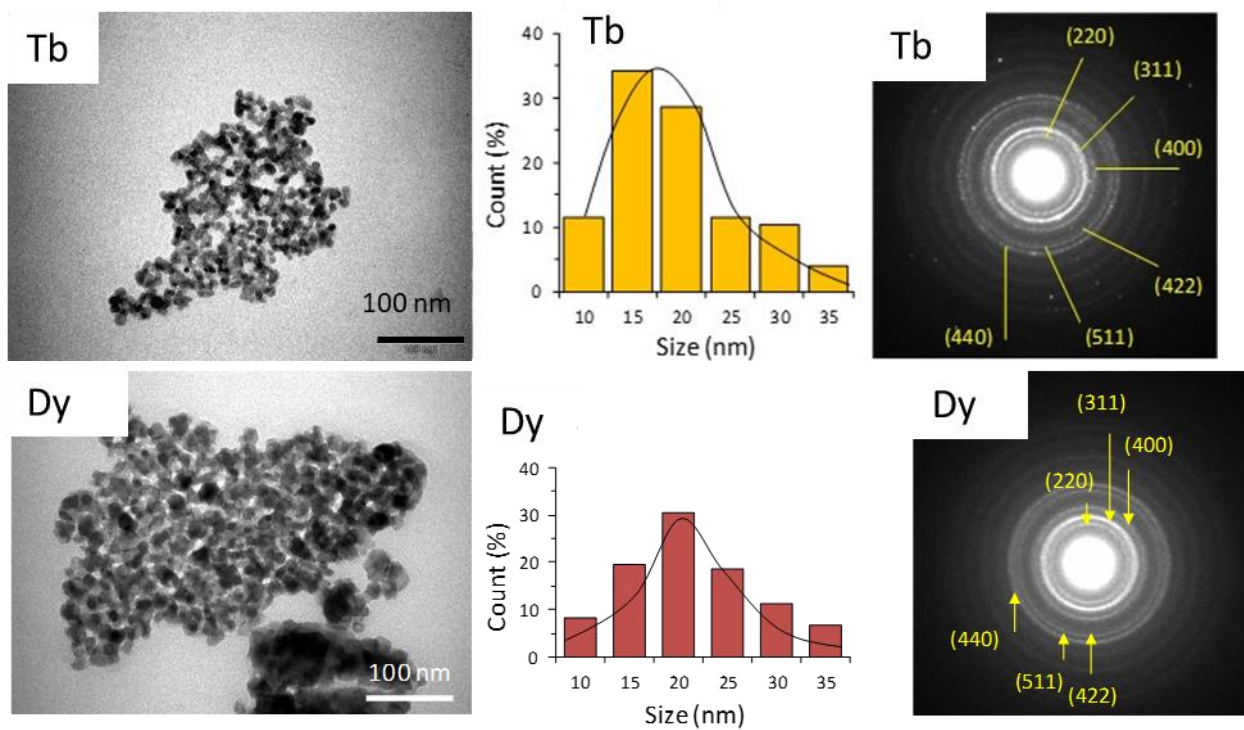


Figure 3. TEM images of Tb substituted Ni-Cu-Zn NSF

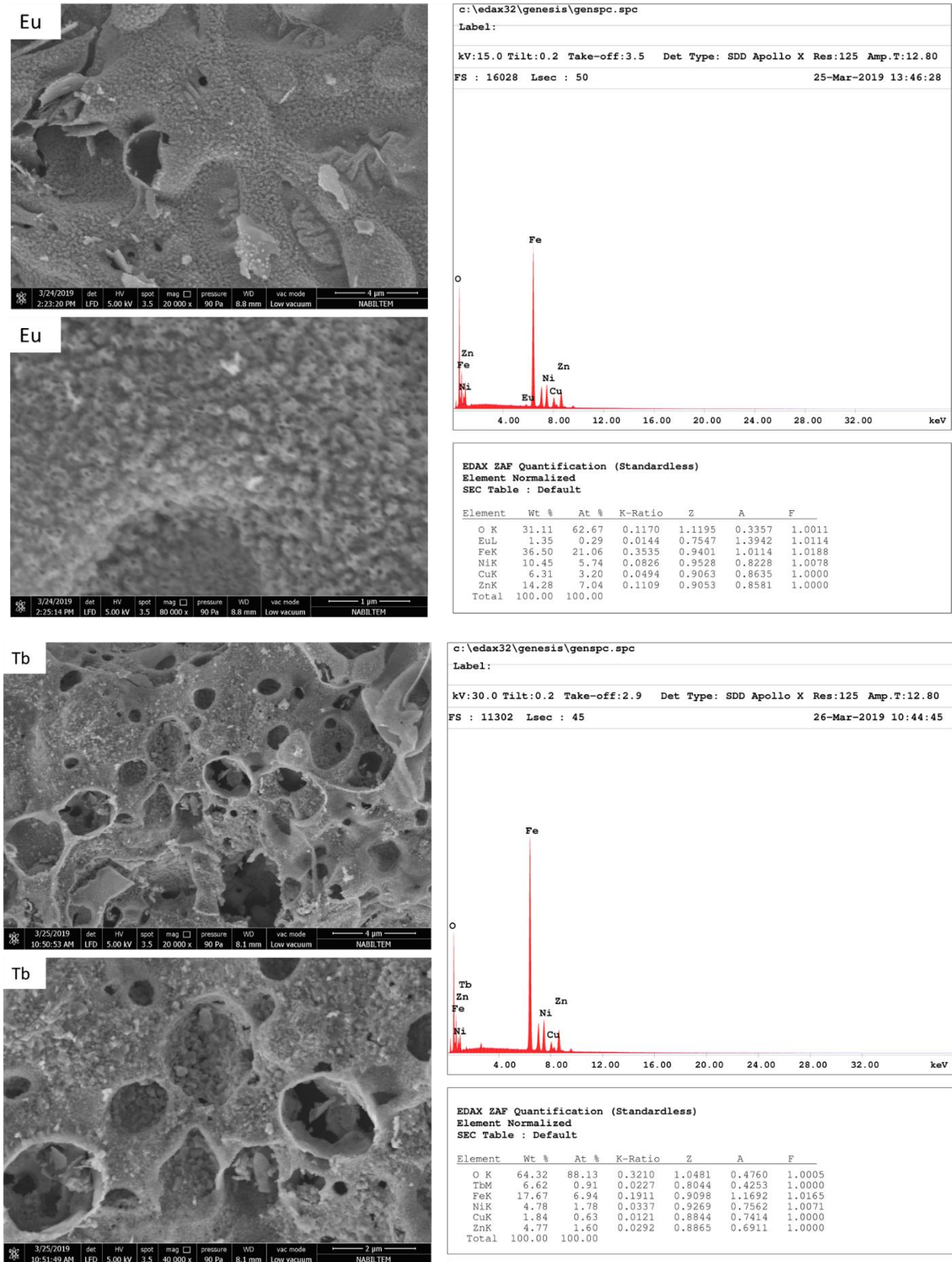


Figure 4. SEM images of Ni<sub>0.4</sub>Cu<sub>0.2</sub>Zn<sub>0.4</sub>RE<sub>0.02</sub>Fe<sub>1.98</sub>O<sub>4</sub> NSFs.

### 3.3. VSM Analysis

A Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) magnetometer (Quantum Design) equipped with a vibrating sample magnetometer (VSM) head was used to measure the magnetic properties of Ni-Cu-Zn ferrites. Fig. 5 illustrates the impact of the RE<sup>3+</sup> substitution on the saturation magnetization (M<sub>s</sub>), remanent magnetization (M<sub>r</sub>) and coercivity (H<sub>c</sub>) values of Ni-Cu-Zn ferrites. The numerical values of magnetic parameters M<sub>s</sub>, M<sub>r</sub>, H<sub>c</sub>, S (remanence squareness:  $S = M_r/M_s$ ), and μ<sub>B</sub> (experimental magnetic moment) were listed in Table 2. All ferrites

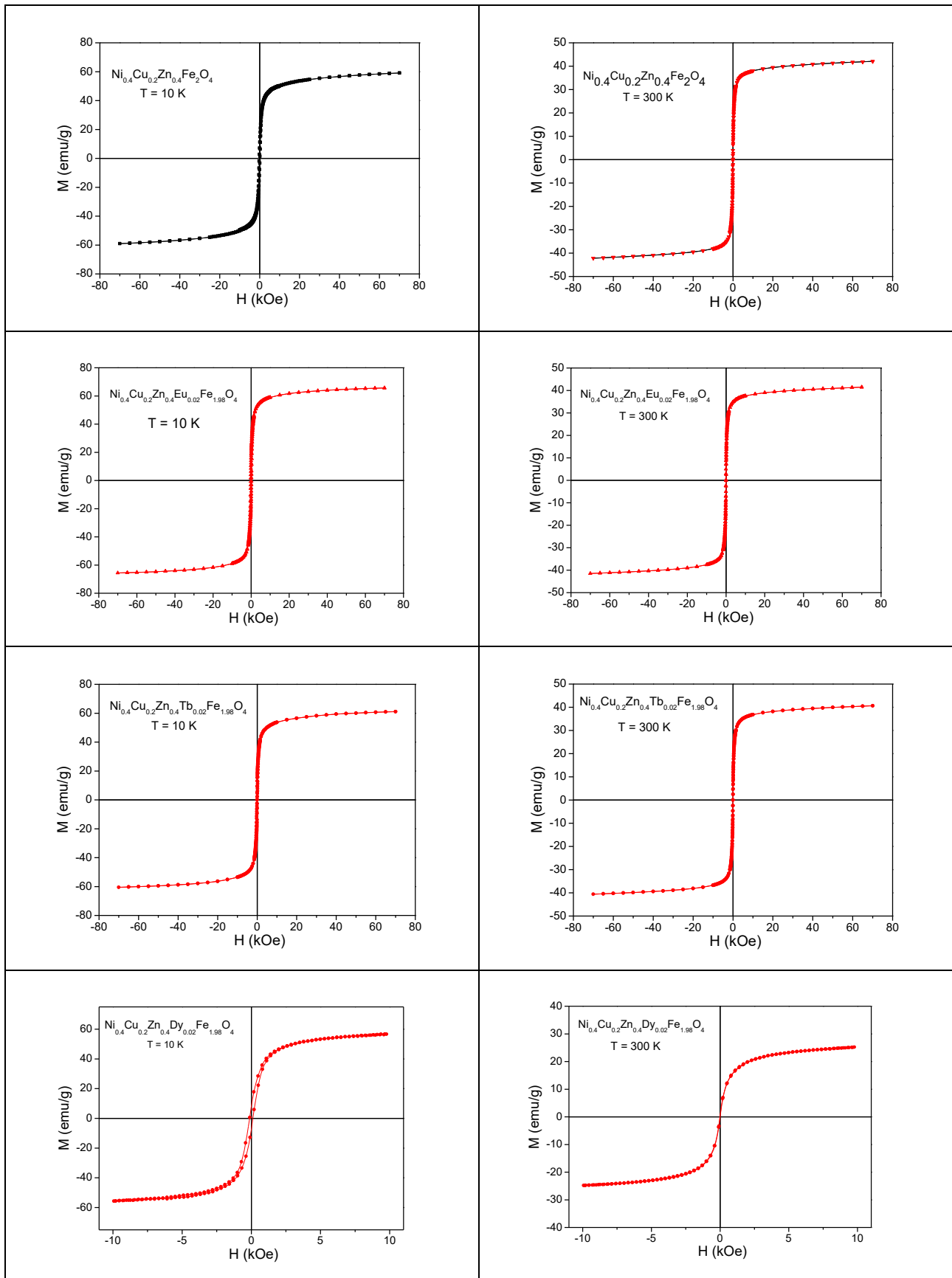
exhibit an S shaped hysteresis curve with no coercivity at room temperature (RT), hence superparamagnetic behavior, and very low coercivities at low temperature (10 K) which indicate their soft magnetic characteristics. The coercivity values follow a similar trend with crystallite sizes as expected. In addition, the unsubstituted NCZF nanoparticles display  $M_s$  values of 42.06 emu/g and 68.77 emu/g at RT and 10 K, respectively. These values are lower when compared to their bulk inverse counterpart, which can be assigned due to the presence of much smaller ferrite crystallites in the sample (Liang-Qiu et al., 2011). The decrease in the  $M_s$  value of the NCZF NPs can be explained by the core-shell model. The core has spins that are aligned magnetically whereas the shell, surface of the nanoparticle displays a spin glass-like state owing to the disrupted exchange interactions (Priyadharsini et al., 2009). The surface-to-volume ratio in nanoparticles is considerably larger and therefore, the larger surface has an impact on the magnetization by spin disordering. In general,  $M_s$  and  $M_r$  values and coercivities of  $RE^{3+}$  substituted NCZF nanoparticles are smaller than that  $Ni_{0.4}Cu_{0.2}Zn_{0.4}Fe_2O_4$  nanoparticles and follow a decreasing trend with the increasing atomic number of dopants at both RT and low temperature. In the spinel ferrite crystal structure, there are two types of superexchange interactions: inter-sublattice between A and B sites and intra-sublattice between A-A sites as well as between B-B sites. According to Néel's model, the inter-sublattice interactions are considerably stronger than the intra-sublattice interactions (Néel, 1948). In the undoped ferrite, the main contribution to the magnetization comes from highly magnetic ferric ions ( $5 \mu_B$ ) that are present in the B sites (Kadam et al., 2012). Upon doping, the occupancy of the octahedral sites (B) are preferred by the larger rare earth ions and therefore there will be less number of  $Fe^{3+}$  ions to occupy B sites. This will result in weaker B-B interactions and hence A-B interactions and consequently the magnetic moment will be lowered owing to the replacement of ferric ions with non-magnetic rare earth ions (Dasan et al., 2017). The antiferromagnetic coupling between A and B sites arises and spinel lattice is distorted due to the substitution of  $Fe^{3+}$  with  $RE^{3+}$  are other factors which contribute to the drop in the magnetization.

The experimental magnetic moment,  $\mu_B (obs)$ , was calculated by the following equation  $\mu_B(obs) = (M_w \times M_s) / 5585$  where  $M_w$  is the molar mass of the compound and  $M_s$  stands for saturation magnetization.  $\mu_B$  values calculated are between 2.434 and 2.820 which are lower than that of the undoped NSF at RT. The Bohr magneton decreases by increasing molecular weight and is the minimum for the  $Dy^{3+}$  substituted NCZF. This might be due to the weakening of inter-sublattice (A-B) superexchange interactions (Almessiere et al., 2019c). The remanence squareness can give information about the grain variation. Values for remanence squareness at both temperatures were found to be lower than 0.5 which indicate the synthesized nanoparticles have a single domain nature with uniaxial anisotropy and the easy axis being randomly oriented according to Stoner-Wohlfarth theory (Caruntu et al., 2007; Saura-Múzquiz et al., 2016; Stoner and Wohlfarth, 1948). In addition, remanence squareness values lower than 0.5 indicate a strong spin-disordering exists on the surface (Almessiere et al., 2019b; Sadaqat et al., 2019).

**Table 2.** The deduced magnetic parameters of the  $Cu_{0.4}Ni_{0.2}Zn_{0.4}RE_{0.02}Fe_{1.98}O_4$  NSFs at 10 K ( $M_{max,20}$ : max magnetization at 20 kOe,  $M_s$ : saturation magnetization,  $M_r$ : remanence magnetization,  $S$ : remanence squareness,  $H_c$ : coercivity and  $n_B$ : magnetic moment)

Compound	MW (g/mol)	10 K				300 K				
		$M_s$ (emu/g)	$H_c$ (kOe)	$M_r$ (emu/g)	$S$	$\mu_{f.u.}$ ( $\mu_B$ )	$M_s$ (emu/g)	$H_c$ (kOe)	$M_r$ (emu/g)	$S$
$Cu_{0.4}Ni_{0.2}Zn_{0.4}Fe_2O_4$	238.032	68.77	0.17	17.18	0.250	2.931	42.06	0.046	4.15	0.0985
$Cu_{0.4}Ni_{0.2}Zn_{0.4}Eu_{0.02}Fe_{1.98}O_4$	239.955	65.63	0.18	15.51	0.236	2.820	41.35	0.050	5.02	0.123
$Cu_{0.4}Ni_{0.2}Zn_{0.4}Tb_{0.02}Fe_{1.98}O_4$	240.094	61.04	0.073	9.34	0.153	2.624	40.65	0.049	4.61	0.113
$Cu_{0.4}Ni_{0.2}Zn_{0.4}Dy_{0.02}Fe_{1.98}O_4$	240.166	56.60	0.11	7.63	0.134	2.434	25.23	0.001	0.46	0.309





**Figure 5.** Magnetization ( $M$ ) vs. applied field ( $H$ ) of  $\pm 10$  kOe, curves,  $M(H)$  for undoped and doped  $\text{Ni}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.4}\text{RE}_{0.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$  NSFs; Left: at 10 K, and. Right: at RT.

#### 4. Conclusion

In this study, nano-sized Ni-Cu-Zn ferrites substituted with rare earth ions  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ , and  $\text{Dy}^{3+}$  in were prepared by a sonochemical method. The FT-IR spectra depicted the vibrational bands of spinel ferrites. The XRD results revealed that the products showed a spinel ferrite structure with phase homogeneity. In general the crystallite sizes (13-22 nm) increased with the rise of the ionic radius of the dopant ions. In addition, there was a slight drop in the lattice parameter ( $a$ ) with  $\text{RE}^{3+}$  substitution, which confirmed the incorporation of the rare earth ions. TEM and SEM analyses verified the cube-like nanoparticles with sizes (around 20 nm) similar to the crystallite sizes calculated from XRD results and diffraction patterns of the particles. The magnetization studies conducted by VSM analysis displayed the nanoparticles exhibited superparamagnetic behavior at room temperature and very low coercivity values at 10 K indicating their soft magnetic characteristics. The coercivity values were found to be in parallel with crystallite sizes. The octahedral site preference of the rare earth ions caused a decrease in the saturation magnetization values. A drop in the saturation magnetization values was observed with a decrease in the ionic size of the dopant ions.

#### Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

#### References

- Ahmad, S.I., Ansari, S.A., Ravi Kumar, D., 2018. Structural, morphological, magnetic properties and cation distribution of Ce and Sm co-substituted nano crystalline cobalt ferrite. *Materials Chemistry and Physics*, 208, 248-257.
- Ahmed, M., Ramulu Torati, S., Parvatheeswara Rao, B., Abdel Hamed, M., Kim, C. 2015. Size controlled sonochemical synthesis of highly crystalline superparamagnetic Mn-Zn ferrite nanoparticles in aqueous medium.
- Almessiere, M.A., Demir Korkmaz, A., Slimani, Y., Nawaz, M., Ali, S., Baykal, A., 2019a. Magneto-optical properties of rare earth metals substituted Co-Zn spinel nanoferrites. *Ceramics International*, 45, 3449-3458.
- Almessiere, M.A., Slimani, Y., Güner, S., Baykal, A., Ercan, I., 2019b. Effect of dysprosium substitution on magnetic and structural properties of  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles. *Journal of Rare Earths*, 37, 871-878.
- Almessiere, M.A., Slimani, Y., Güner, S., Nawaz, M., Baykal, A., Aldakheel, F., Akhtar, S., Ercan, I., Belenli, İ., Özçelik, B., 2019c. Magnetic and structural characterization of  $\text{Nb}^{3+}$ -substituted  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles. *Ceramics International*, 45, 8222-8232.
- Ansari, M.M.N., Khan, S., Ahmad, N., 2018. Effect of  $\text{R}^{3+}$  ( $\text{R} = \text{Pr}$ ,  $\text{Nd}$ ,  $\text{Eu}$  and  $\text{Gd}$ ) substitution on the structural, electrical, magnetic and optical properties of Mn-ferrite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 465, 81-87.
- Batoo, K.M., Ansari, M.S., 2012. Low temperature-fired Ni-Cu-Zn ferrite nanoparticles through auto-combustion method for multilayer chip inductor applications. *Nanoscale Research Letters*, 7, 112.
- Caruntu, D., Caruntu, G., O'Connor, C.J., 2007. Magnetic properties of variable-sized  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles synthesized from non-aqueous homogeneous solutions of polyols. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40, 5801.
- Dantas, J., Santos, J.R.D., Cunha, R.B.L., Kiminami, R.H.G., Costa, A.C.F., 2013. Use of Ni-Zn ferrites doped with Cu as catalyst in the transesterification of soybean oil to methyl esters. *Materials Research*, 16, 625-627.
- Dasan, Y.K., Guan, B.H., Zahari, M.H., Chuan, L.K., 2017. Influence of  $\text{La}^{3+}$  Substitution on Structure, Morphology and Magnetic Properties of Nanocrystalline Ni-Zn Ferrite. *PLOS ONE*, 12, e0170075.
- Fu, Y.-P., Chang, W.-K., Wang, H.-C., Liu, C.-W., Lin, C.-H., 2010. Synthesis and characterization of anatase  $\text{TiO}_2$  nanolayer coating on Ni-Cu-Zn ferrite powders for magnetic photocatalyst. *Journal of Materials Research*, 25, 134-140.
- Gabal, M.A., Asiri, A.M., AlAngari, Y.M., 2011. On the structural and magnetic properties of La-substituted NiCuZn ferrites prepared using egg-white. *Ceramics International*, 37, 2625-2630.
- Goswami, P.P., Choudhury, H.A., Chakma, S., Moholkar, V.S., 2013. Sonochemical Synthesis and Characterization of Manganese Ferrite Nanoparticles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 17848-17855.
- Harris, V.G., Sokolov, A.S., 2019. The Self-Biased Circulator: Ferrite Materials Design and Process Considerations. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32, 97-108.
- Harzali, H., Marzouki, A., Saida, F., Megriche, A., Mgaidi, A., 2018. Structural, magnetic and optical properties of nanosized  $\text{Ni}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.4}\text{R}_{0.05}\text{Fe}_{1.95}\text{O}_4$  ( $\text{R} = \text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$  and  $\text{Pr}^{3+}$ ) ferrites synthesized by co-precipitation method with ultrasound irradiation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 460, 89-94.
- Jacob, B.P., Thankachan, S., Xavier, S., Mohammed, E.M., 2013. Effect of  $\text{Tb}^{3+}$  substitution on structural, electrical and magnetic properties of sol-gel synthesized nanocrystalline nickel ferrite. *Journal of Alloys and Compounds*, 578, 314-319.
- Kadam, R.H., Karim, A., Kadam, A.B., Gaikwad, A.S., Shirsath, S.E., 2012. Influence of  $\text{Cr}^{3+}$  substitution on the electrical and magnetic properties of  $\text{Ni}_{0.4}\text{Cu}_{0.4}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$  nanoparticles. *International Nano Letters*, 2, 28.
- Kesavamoorthi, R., Raja, C.R., 2017. Substitution Effects on Rare-Earth Ions-Doped Nickel-Zinc Ferrite Nanoparticles. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 30, 1207-1212.
- Khan, M.Z., Gul, I.H., Anwar, H., Ameer, S., Khan, A.N., Khurram, A.A., Nadeem, K., Mumtaz, M., 2017. Massive dielectric properties enhancement of MWCNTs/ $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanohybrid for super capacitor applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 424, 382-387.
- Liang-Qiu, G., Guo-Jian, Y., Ying, W., Fu-Lin, W., 2011. Study of NiCuZn ferrite powders and films prepared by sol-gel method. *Chinese Physics B*, 20, 027503.

- Néel, M.L., 1948. Propriétés magnétiques des ferrites ; ferrimagnétisme et antiferromagnétisme. *Annales de Physique*, 12, 137-198.
- Priyadharsini, P., Pradeep, A., Chandrasekaran, G., 2009. Novel combustion route of synthesis and characterization of nanocrystalline mixed ferrites of Ni-Zn. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321, 1898-1903.
- Sadaqat, A., Almessiere, M., Slimani, Y., Guner, S., Sertkol, M., Albetran, H., Baykal, A., Shirsath, S.E., Ozcelik, B., Ercan, I., 2019. Structural, optical and magnetic properties of Tb<sup>3+</sup> substituted Co nanoferrites prepared via sonochemical approach. *Ceramics International*, 45, 22538-22546.
- Saura-Múzquiz, M., Granados-Mirallas, C., Stingaciu, M., Bøjesen, E.D., Li, Q., Song, J., Dong, M., Eikeland, E., Christensen, M., 2016. Improved performance of SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> bulk magnets through bottom-up nanostructuring. *Nanoscale*, 8, 2857-2866.
- Sharifi, I., Shokrollahi, H., Amiri, S., 2012. Ferrite-based magnetic nanofluids used in hyperthermia applications. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 324, 903-915.
- Slimani, Y., Almessiere, M.A., Nawaz, M., Baykal, A., Akhtar, S., Ercan, I., Belenli, I., 2019. Effect of bimetallic (Ca, Mg) substitution on magneto-optical properties of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Ceramics International*, 45, 6021-6029.
- Stoner, E.C., Wohlfarth, E.P., 1948. A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 240, 599-642.
- Taghavi Fardood, S., Ramazani, A., Golfar, Z., Joo, S.W., 2017. Green synthesis of Ni-Cu-Zn ferrite nanoparticles using tragacanth gum and their use as an efficient catalyst for the synthesis of polyhydroquinoline derivatives. *Applied Organometallic Chemistry*, 31, e3823.
- Umut, E., Coşkun, M., Pineider, F., Berti, D., Güngüneş, H., 2019. Nickel ferrite nanoparticles for simultaneous use in magnetic resonance imaging and magnetic fluid hyperthermia. *J Colloid Interface Sci*, 550, 199-209.



## YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARI, AVRUPA BİRLİĞİ DEMİRYOLU POLİTİKALARI VE BU BAĞLAMDA TÜRKİYE'DEKİ GELİŞMELERİN İNCELENMESİ

Mehmet Fatih ALTAN<sup>1\*</sup>, Mehmet Çağrı KIZILTAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Yüksek Hızlı Demiryolları,  
Avrupa Birliği,  
Master Plan,  
Entegrasyon,  
Yolcu ve Yük Taşımacılığı.*

### Öz

Kentsel odak noktaları ile mücavir alan arasındaki fiziksel dengenin yüksek hızlı demiryolları ile temininin yanı sıra söz konusu bölgeler arasındaki erişilebilirlik de artmaktadır. Diğer taraftan, merkez ve çevre arası ekonomik dengesizliğin artma ihtimali de söz konusudur. Dolayısıyla, yüksek hızlı demiryolları yatırımlarını bağlayan birçok parametre söz konusudur. Bunlar ekonomik, sosyal, teknik, kültürel ve politik olmak üzere birçok aşamayı da ihtiva etmekte olup belirleyici bir öneme sahip olmaktadır. Bu çerçevede, bir yüksek hızlı demiryolu hattının, bölgesel merkezlerin imajını ve erişilebilirliğini, yeni bir hattın ana kent ve küçük kentlere getirdiği rekabet olanaklarını nasıl etkilediği soruları ortaya konmaktadır. Bütün bu koşullar, YHD istasyonlarının konumlanmasına bağlı olarak gelişmektedir. Söz konusu yerleşim trenlerin terminaller ve ara duraklarda dur kalk periyotlarına bağlı olan hizmet unsurlarını kapsamaktadır. Bu çalışma kapsamında öncelikle yüksek hızlı demiryollarının kapsamı ortaya konmuştur. Ardından Avrupa Birliği'nde yüksek hızlı demiryolları bağlamında gelişme eğilimleri paylaşılmıştır. Türkiye'nin konumu, yüksek hızlı demiryollarında performansı ve bunun AB ile olan ilişkisi de incelenmiştir.

## A REVIEW OF DEVELOPMENT TRENDS IN TURKEY ON THE CONTEXT OF EUROPEAN UNION RAILWAY POLICIES AND HIGH SPEED RAILWAYS

### Keywords

*High Speed Railway,  
European Union,  
Master Plan,  
Integration,  
Passenger and Freight  
Transport.*

### Abstract

The accessibility between urban focus points and peripheral area increase as well as obtaining the physical balance between mentioned regions by high speed railways. On the other hand, enhancing of economical unbalance between center and periphery is possible, too. Accordingly, there are many parameters that connect high speed railway investments. These include various phases as economic, social, technical, cultural and politic that have a determinant importance. The questions about the type of the effect of competition possibilities that come from a new line to main city and small cities and the impact of a high speed railway line to the image and accessibility of regional centers are revealed. All of these conditions develop depending on the location of high speed railway stations. This location contains service elements depending on frequencies on stop and go's for either terminals or way stations. In this study, the extension of high speed railways is presented. Then the development trends in the context of high speed railway in European Union (EU) is shared. The position, high speed railway performance and its relation with EU of Turkey is investigated.

### Alıntı / Cite

Altan, M.F., Kızıldaş, M.Ç., (2020). Yüksek Hızlı Demiryolları, Avrupa Birliği Demiryolu Politikaları ve Bu Bağlamda Türkiye'deki Gelişmelerin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 635-642.

\*İlgili yazar / Corresponding author: mehmetaltan@aydin.edu.tr, +90-212-425-5759

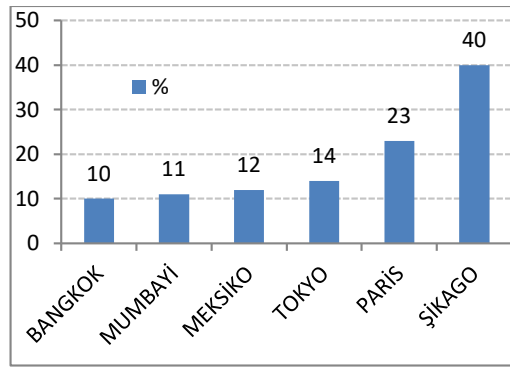
Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
M.F. Altan, 0000-0003-0961-0115	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	01.03.2018
M.Ç. Kızıldaş, 0000-0001-9852-9428	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	26.12.2019
	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	23.04.2020
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Yüksek hızlı demiryolları ile ilgili olarak literatürde 1980'lerde yapılan çalışmalar önemlidir. Zira bu tarz çalışmalar kapsamında yüksek hızlı demiryollarının etkilerin Fransa'da Paris-Lyon TGV hattının etkileri detaylı olarak sınırlanmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar ile Paris ve Lyon arasında yüksek hızlı demiryollarının işletime alınması sonrası, kapsamlı veri toplanması ile Rhône-Alpes Bölgesindeki turizm ve hizmet sektöründeki etkiler incelenmiştir. İlgili çalışmalar 1987 yılında yoğunlaştığında Grenoble, St. Etienne, Dijon ve Besançon'a kadar uzanan bir TGV hizmeti söz konusu idi. İlgili çok sayıda araştırma söz konusu yüksek hızlı demiryolu hattı işletimi sonrası esasen ekonomik kazanımlar Rhône-Alpes ile Burgundy'de Paris'te olduğunu göstermekte iken AR-GE ve danışmanlık gibi sektör kollarının da bu süreçte ilerleme kaydettiği anlaşılmaktadır (Wong vd., 2002).

Yüksek hızlı demiryolları küresel ölçekte hem demiryollarında ve hem de kentler arası ulaştırmada yeni bir aşamayı ifade etmektedir. Çünkü sürdürülebilirlik, çevresel kaygılar, enerji kaynaklarının verimi ile ilgili kısıtlar gün geçtikçe ulaştırma sistemlerinde daha çok yer tutmaya başlamıştır. Yüksek hızlı demiryolları gerek az yer kaplaması, gerek daha çevreci olması, gerek 200-600 km gibi mesafelerde havayollarına nazaran daha rekabetçi olması, gerek enerji verimli olması gibi özellikleri ile öne çıkmıştır. Bu hali ile günden güne yüksek hızlı demiryollarına (YHD) olan ilgi artmaktadır. Yüksek hızlı demiryolları ulaştırma türünün ilk örnekleri Japonya, Fransa ve Almanya'da ortaya çıkmıştır. Günümüzde bu ulaştırma türünde Japonya, İspanya, Çin ve Fransa en ileri örnekleri teşkil etmektedir. Dolayısı ile bu örneklerin detaylı incelenmesi, konu ile ilgili küresel standardın ve gelişmelerin algılanmasına da yardımcı olabilir. Fransa'da Paris merkezli ilk gelişmelerin ardından takip eden süreçte yapılan araştırmalar ise ülkenin güneydoğu koridorunda uzanan LGV Sud-Est yüksek hızlı demiryolu hattının ekonomik gelişim ve iş faaliyetlerinde baskın unsur düzeyinde bir belirleyiciliğe sahip olduğunu göstermektedir. Zira Fransa'da ekonomik kalkınma ile ilgili hamlelerin çok parçalı ve bileşenli olmayışının da etkisi ile özellikle de ülkenin güneydoğu hattındaki kentlerde ekonomik faktörlerde yüksek hızlı demiryollarının tali bir etkisinin olduğu ortaya konmuştur. Takip eden yıllarda ekonomik gelişim dinamikleri ele alınmaya devam ettiğinde, TGV'nin işletim etkisi paralelinde Valence ve benzeri yerleşimlerde kayda değer büyümeler gerçekleşmiş olup bölgesel odak özelliğindeki kentlerde, özellikle de Paris'te bir büyüme olmadığı görülmüştür.

Japonya'da ise yüksek hızlı tren hizmeti sunan Shinkansen trenlerinin gelişim ve büyümedeki çok büyük bir etkiye sahip olduğu raporlanmaktadır. Buna örnek olarak Shinkansen ile birlikte Tokaido hattıyla Tokyo'ya bağlanan, Tokyo'dan 230 km uzaklıktaki Kakegawa'daki ileri düzeydeki gelişim verilebilir. Söz konusu kentte 1988-1992 yılları arasında, inşa edilmiş bir yüksek hızlı demiryolu istasyonu sayesinde %8'lik bir büyüme kaydedilmiştir (Wong vd., 2002). Bununla beraber Japonya dışından kimi araştırmacılar ise Shinkansen'in ekonomik büyüme üzerindeki olumlu etkisini kabul etmekte ancak b noktada daha mütevazı değerlendirmelerde bulunmaktadır. Bunun nedeni ise ekonomik faktörlerin bazılarının diğer bölgelerden ziyade merkezi bölgelerin değerlendirmelerine dâhil edilme ihtimalidir. Ayrıca Shinkansen Tokaido hattının etkisi bağlamında bakıldığında büyümenin bu hat üzerindeki Osaka ve Nagoya'da yavaşlamaya başladığı, Tokyo'da ise aynı eğilim ile devam etme eğiliminde olduğu yönünde olup bu göstergeler 20 yılı aşkın süredir toplanan veriler dâhilinde elde edilmektedir (Wong vd., 2002). Genel anlamda, Brüksel, Rotterdam, Londra ve Lille'deki yüksek hızlı demiryolu istasyonları mücavir alanlarındaki kentsel yenilenme ve dönüşümü olumlu yönde etkilemiş görünmektedirler. Şekil 1'de dünyada önde gelen kent merkezlerinde ulaştırmaya ayrılan kentsel alan dağılımları verilmektedir (Agarwal, 2001). Bütün bu veriler ışığında başta Japonya ve Avrupa Birliği'ndeki (AB) durumun netleştirilmesi, küresel eğilimlerin anlaşılmasına ön ayak olabilir. Bu bağlamda bu çalışma kapsamında, yüksek hızlı demiryollarının geldiği nokta, Avrupa Birliği'nin bu konu ile ilgili plan ve projeksiyonları açıklanmaya çalışılmaktadır. Bu kapsamda çalışmanın nihai amacı ise Türkiye'de yüksek hızlı demiryolları gelişiminin özetlenerek yapılması gerekenler ile ilgili sonuç ve önerilerin de ortaya konulmasıdır.

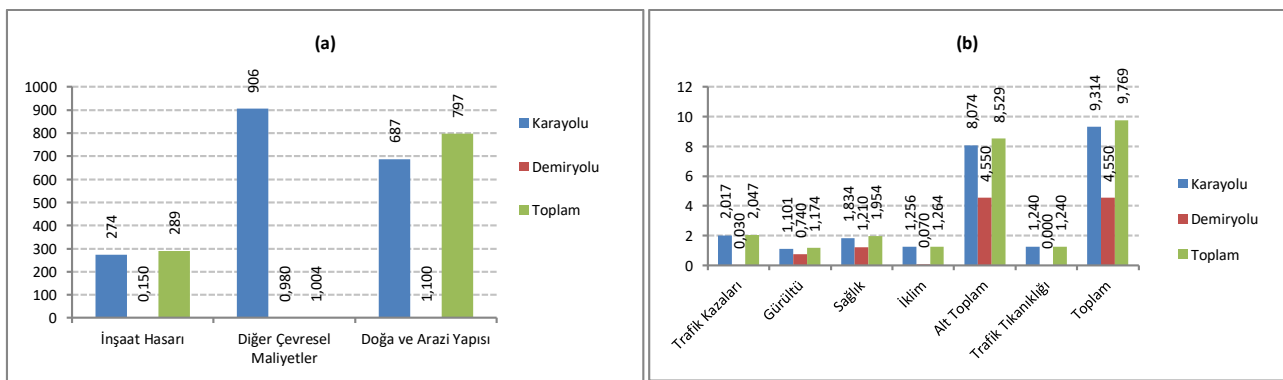


Şekil 1. Kent Merkezlerinde Ulaştırmaya Ayrılan Kentsel Alan Dağılımı (Urban Area For Transportation Distribution On Urban Centers) (Agarwal, 2001)

### 1.1. Avrupa Birliği (AB) Demiryolları (European Union Railways)

Avrupa Birliği'nde yıllık ortalama %1'lik bir Gayri Safi Milli Hâsıla (GSMH) payını ifade eden havayolu ve karayolu ulaştırma türlerinin trafiğine karşın hizmet parametrelerinden olan beklenti ise sürekli olarak daha da artmaktadır. Bu çerçevede, yük taşımacılığının yüksek hızlı demiryolu özelinde 2005 yılına nazaran 2030 için %40, 2050 için ise %80 büyümeye kaydetmesi beklenmektedir. Söz konusu büyümeye yüzdeleri yüksek hızlı demiryolu ulaştırma türü yolcu taşımacılığı için ise ilgili yıllara göre sırasıyla %34 ve %51 olarak hesaplanmaktadır. Petrolün sürekli azalmakta olduğu ve 2050 yılı itibari ile günümüzün iki katı bir fiyata haiz olacağı düşünülür ise günümüzde enerji ihtiyaçlarının %96'sını petrolden karşılayan bir Avrupa gerçeğinin neden demiryolu ulaştırma türünde radikal değişim kararları planladığı net olarak anlaşılacaktır. Bununla beraber Avrupa Birliği %60'luk petrol kullanım azaltılmasına 2050'ye kadar ulaştığı takdirde, küresel ısınmanın belirlenen sınırdan durdurulması hedefinden sapılmamış olunacaktır (UIC, 2012).

Avrupa'da yüksek hızlı bir demiryolu ağının oluşturulması konusunda ilk çalışmalar 1985 yılında AT ülkeleri ile İsviçre ve Avusturya Demiryollarının oluşturduğu Avrupa Demiryolları Topluluğu (Community of European Railways) tarafından başlatılmıştır. Avrupa Birliği üye ülkeleri Türkiye ile entegre olabilecek çaptaki coğrafi yayılıma haiz bir kıta sathı demiryolu ağı hedefine sürece hız kazandırma çabaları sonucunda yaklaşmışlar ve AGC ile TER gibi anlaşmalar kıtanın tamamında tek sistemde entegre bir işletim ve standart sisteminin hayata geçirilmesi amacı ile gerçekleştirilmişlerdir. Cenevre'de 1990 yılında Türkiye'nin de bulunduğu 19 Avrupa ülkesi TER meydana getirilmiştir. Yatırım stratejilerinin katılımcı ülkeler dâhilinde kısa, orta ve uzun erimli olarak fayda ve emniyet paralelinde meydana getirilmesi amacı ile TER ve TEM'in Master Planları Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomi Komisyonu'nca 2006 senesinde oluşturulmuştur. Şekil 2'de İsviçre'de ulaştırma yatırımlarının dışsal maliyetleri verilmiştir (Wiewel vd., 2015).



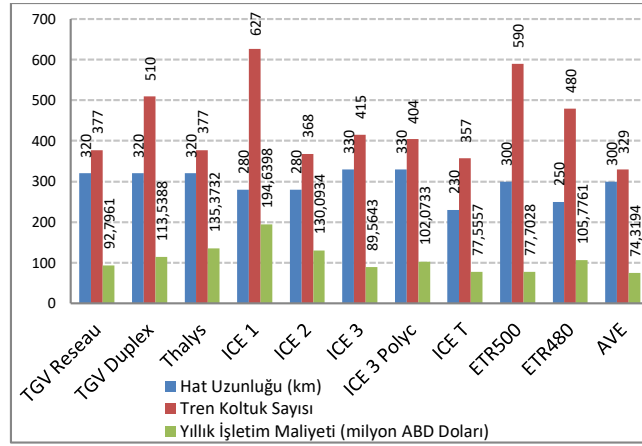
Şekil 2. İsviçre Ulaştırma Dışsal Maliyetleri (milyon ABD Doları) (Switzerland Transportation External Costs) (Wiewel vd., 2015)

Tablo 1'de Britanya demiryollarında parasallaştırılan zaman değerleri gösterilmektedir (Miyako ve Yamamoto, 1997).

Uygulama bölgelerinde Master Plan sayesinde ulaştırma performansı ve standartlarının arttırıcı imkân ve ihtimallere kavuşulabilmektedir. Master Plan kapsamında bugüne kadar; 491 karayolu ve demiryolu projesinin %45'i tamamlanmıştır. Birçok yeni engel ekonomik, teknolojik, sosyal, politik, kültürel değişimler paralelinde Master plan sürecinde kendini göstermektedir (Takatsu, 2007). Yatırım konuları ve politikaları elbette ki maliyet hususu ile doğrudan ilintilidir.

**Tablo 1.** Britanya Demiryolu Değerlemelerine Göre Zaman Değerleri (Euro/saat) (Time Values According to Britain Railway Valuations) (Takatsu, 2007)

Yolculuk Türü	Euro/saat
İş Yolculuğu	37.68
Günlük Düzenli Yolculuklar	8.03
Gezi Amaçlı Yolculuklar	7.12

**Şekil 3.** Tren Teknolojilerinin İşletim Maliyetlerinin Karşılaştırılması (Comparison of Train Technologies Operation Costs) (Bussieck vd., 1997)

Bu bağlamda ise de gerek ilk yapım maliyeti ve gerekse de hizmet ömrü süresince işletim ve bakım onarım, yenileme maliyetleri önemli olabilmektedir. Bu çerçevede Şekil 3'de ise tren teknolojileri işletim maliyetlerinin bir karşılaştırması sunulmuştur.

### 1.2. Uluslararası Ana Demiryolu Hatları Avrupa Antlaşması (AGC) (International Main Railway Lines European Agreement)

Türkiye, Avrupa Birliği'nin güneydoğu komşusu konumundadır. Nüfus bakımından Almanya ile birlikte Avrupa'nın en büyük ülkesi olan Türkiye yüzölçümü bakımından da bütün Avrupa ülkelerinden daha büyüktür. Kuzeyde Ukrayna ile birlikte doğ batı ekseninde yolcu ve yük taşımada kilit rolde bulunan ülkemiz, istikrarı ile de Ukrayna'nın önüne geçmektedir. Bütün bu nedenlerden dolayı teknik konularda ülkemizin Avrupa Birliği ile yakaladığı uyum ve ortak standart düzeyleri önemlidir.

Ülkemizin de üye olduğu bir anlaşma olarak AGC, Uluslararası Ana Demiryolu Hatları Avrupa Antlaşması olup 1989'da kabul edilmiştir. Bu anlaşma ile güdülen hedef Avrupa'da kıta sathında yüksek standartlara ve işletim koşullarına haiz bir yüksek hızlı demiryolu ağı oluşturmaktır.

Avrupa Birliği (AB) üyelerinin demiryolu ulaştırma türlerini ilerletmelerini güdüleyen ortak kuralların oluşturulması hususundaki en net aşama 29 Temmuz 1991 tarih ve 91/440 sayılı Konsey Yönergesi ile ortaya konmuştur. Söz konusu yönerge maddeleri dâhilinde AB üye ülkeleri demiryolu ağının entegrist bir anlayış ile oluşturulması ile etkinlik ve verimliliğin artırılması yönünde amaçlar belirlenmiştir:

- ✓ İdarî bağımsızlık: Üye ülkelerin almaları gerekli olan önlemler bağımsız bir yapıyı teminlerini ticari şirket esaslarına ve demiryolu ulaştırma türü kurumlarının pazar ihtiyaçlarına göre bir muhtevaya haizdir.
- ✓ Altyapı ve işletmeciliğin ayrılması: İdari ve bütçesel olarak işletim ve altyapı standartlarına bağlı işler birbirinden net sınırlar ile ayrılmalıdır.
- ✓ Finansman yapılarının iyileştirilmesi: Hâlihazırdaki demiryolu şirketlerinin kamu denetimi paralelinde yeterli mali yapıya erişmesi için üye ülkelerin güvencesi gerekmektedir.
- ✓ Demiryolu altyapısına erişim hakkı: Üye ülkelerin demiryolu şirketlerinin bir araya gelerek oluşturduğu uluslararası gruplara üye ülkelerin altyapısına erişim ve geçiş hakkı verilmelidir (Takatsu, 2007).

1995-2000 yılları periyodunda Avrupa Birliği üyesi olan ülkelerin merkezliğinde Avrupa Birliği kıta sathı ulaştırma ağı politikalarını ifade eden TEN ve yüksek hızlı demiryolu başta olmak üzere kıta sathı demiryolu ağı politikalarını ifade eden TER'in planlama, yatırım, yapım ve işletim süreçlerini meydana getirir iken bir yandan da

eylem planları ve ortaklaşan ulaştırma politikasına yönelik çalışmalar geliştirmektedir. Eylem planları dâhilinde; yolcu ve yük taşımacılığı servislerinde ortak pazar temini, kıta sathında 30.000 km'lik yüksek hızlı demiryolu ağının oluşturulması, ulaştırma hizmet parametrelerinin yükseltilmesi, AB dışı ülkeler ile ulaştırma entegrasyonunun artırılması bulunmaktadır. Söz konusu 30.000 km'lik hat hedefinin 19.000 km'lik bölümü 250 km/saat ve üzerindeki hızlarla işletilecek olup Avrupa ile Türkiye arasındaki yüksek hızlı demiryolu hattı entegrasyonunun Ankara-Eskişehir-Izmit-İstanbul-Edirne-Sofya-Belgrat-Budapeşte-Viyana yolu ile olması öngörülmektedir (Takatsu, 2007). Şekil 3'te karşılaştırmalı yüksek hızlı tren işletim maliyetleri verilmiştir (Bussieck vd., 1997).

## 2. Bilimsel Literatür Taraması (Literature Survey)

### 2.1. Türkiye'de Yüksek Hızlı Demiryolları (YHD) (High Speed Railways In Turkey)

Türkiye yüksek hızlı demiryollarına etkili bir başlangıç yapmış olup söz konusu hız ve planlama ile devam edildiği takdirde ilerleyen dönemlerde İspanya ve Çin'in ardından dünya çapında 3.büyük yüksek hızlı demiryolu ülkesi haline gelmesi ihtimal dâhilindedir. Türkiye'nin yüksek hızlı demiryolu planlamasının odağında Ankara olup başkentten coğrafyanın derinliklerine uzanan dört ana kol şeklinde bir yüksek hızlı demiryolu planlaması olduğu söylenebilir. Bunlardan birisi İstanbul ve Trakya'ya, birisi Afyon, Manisa ve İzmir'e, birisi Konya, Karaman ve Adana-Mersin'e, bir diğeri ise Yozgat-Sivas-Kars istikametine uzanmaktadır. Takip eden yıllarda Karadeniz'e bir uzantı, güney istikametine ikinci bir uzantı olması beklenebilir.

Bunun yanı sıra Mersin üzerinden Gaziantep ve Şanlıurfa'ya, Sivas üzerinden Malatya'ya ve Diyarbakır'a, Erzurum üzerinden de Bitlis ve Van'a uzantılar orta vadede gündemde olan tasarımlardır. Eskişehir'den Antalya'ya, Ankara'dan Nevşehir ve Kayseri'ye, yine Ankara'dan Çorum ve Samsun'a hat planlamaları bulunmaktadır. İstanbul'dan Edirne'ye olan yüksek hızlı demiryolu hattı, Ankara-Yozgat-Sivas-Erzincan-Erzurum-Kars Yüksek Hızlı Demiryolu hattı tamamlandıklarında Marmaray'ın merkezliğinde bütün bir Anadolu sathı doğudan batıya, Kars-Erzurum-Erzincan-Sivas-Yozgat-Ankara-Eskişehir-Izmit-İstanbul-Edirne üzerinden birbirine bağlanacaktır. Söz konusu aks doğuda, Türkiye'nin desteği ile henüz tamamlanmış olan Bakü-Tiflis-Ahilkale-Kars Yüksek Hızlı Demiryolu hattına, batıda da Yunanistan-Bulgaristan Yüksek Hızlı Demiryolu hat bağlantılarına bağlanacaktır. Tablo 2'de karşılaştırmalı ülke YHD planlanan hat uzunlukları verilmiştir.

Tablo 2'den de görüldüğü üzere Türkiye'de oldukça hızlı bir yüksek hızlı demiryolu inşa süreci bulunmaktadır. Konya üzerinden Karaman ve Antalya'ya, Yozgat üzerinden Nevşehir ve Kayseri'ye, diğer taraftan da Eskişehir üzerinden batı Anadolu'dan yine Antalya'ya bağlantılar düşünülmektedir. Bununla beraber, Eskişehir'den geçmeksizin, daha kuzeyden Bolu dolaylarından ikinci bir Ankara-İstanbul yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattı da planlanmaktadır. Bu hat hem daha ileri bir altyapı üzerinde 300 km/saat'lerdeki işletim hızlarında planlanmakta ve hem de güzergâhı da bu bağlamda daha hız yapmaya müsait bir şekilde tasarlanmaktadır. Bundan da öte toplam hat uzunluğunda da Ankara-Eskişehir-İstanbul yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattına nazaran bir kısalma öngörülmektedir.

**Tablo 2.**Yüksek Hızlı Demiryolu Hat Planlama Uzunluklarının Ükelere Göre Değerlendirmesi (Evaluation of High Speed Railways Line Planning Lengths According to Countries) (Vickerman ve Ulid, 2006)

Ülke	Planlanan Yüksek Hızlı Demiryolu Hattı Uzunluğu (km)
Çin	12.900
Türkiye	3960
İspanya	7000
İtalya	600
Tayvan	345

## 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

### 3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Yolcu hacimlerine bakıldığında söz konusu rakamların Fransa için 0,89 milyar, Almanya için 1.68 milyar iken toplamda AB için 64,1 milyar olup Japonya için ise 8,64 milyar olduğu görülmektedir. Ayrıca Japonya'nın yolcu trafik yoğunluğu anlamında (yolcu km/hat km gün) en elverişli trafığe sahip olduğu söylenebilir. Japonya için söz konusu değer 33.002 yolcu km'dir. Avrupa'da bu değer Almanya için 5353 yolcu km iken Fransa için ise 6184 km'dir, Güney Kore'de 23081 olup Avrupa Birliği genelinden de yüksektir.



Demiryolu gelişim karakteristiklerinin yüksek yoğunluklu bölgelerden daha net olarak okunabildiği bu değerlerce ortaya çıkmaktadır. Ülkelerin karşılaştırmalı olarak yüksek hızlı demiryolları hat yoğunluğu Tablo 3'de verilmektedir. Yüksek hızlı demiryollarında önemli bir gösterge olan nüfus yoğunluklarına bakıldığında ise Almanya için bu değer 230 kişi/km<sup>2</sup>, Güney Kore için 467 kişi/km<sup>2</sup>, Fransa için 108 kişi/km<sup>2</sup> ve Japonya için ise 338 kişi/km<sup>2</sup> olduğu görülmektedir. Bu tablodan da %26,8'lik türel dağılım değerinin Japonya için tutarlı olduğu anlaşılmaktadır. Hâlihazırda Japonya'dan daha yüksek nüfus yoğunluklu bir ülke ise Güney Kore'dir.

Buradan hareketle gelecekte demiryolu yatırımlarının artışına paralel olarak yolcu trafiğinde büyük bir artış beklenecek bir ülke de Güney Kore'dir (Vickerman ve Ulid, 2006). Çin ve Tayvan'daki nüfus yoğunluğu ile demiryolu ilişkisi de bu bağlamda değerlendirilebilir. Buradan da anlaşılacağı üzere yüksek hızlı demiryolları 200 km ile 500 km mesafelerde oldukça rekabetçidir. Yüksek hızlı demiryollarında lineer ulaştırma koridorlarında ciddi boyutlarda talep ve kapasite söz konusudur.

### 3.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Küresel lojistik zincir ile bütünleşme ihtiyacı esasen demiryollarında görülmektedir. Bu gerekliliğin temelinde ulaştırma türleri arasındaki geçişlerin optimizasyonuna olan ihtiyaç bulunmaktadır. Lojistiğe dâhil olmuş olan diğer ulaştırma türleri arasında ileri düzeyde bir eşgüdüm ve etkileşim yenilikçi teknikler eşliğinde, sağlam bir ulaştırma altyapısı paralelinde söz konusu türden bir entegrasyona hizmet edecektir.

**Tablo 3.** Demiryolu Paylarının Ülkelere Göre Hat Yoğunluğu Esasına Göre Karşılaştırılması (Comparison of Railway Shares According to Countries In The Basis of Line Densities) (Vickerman ve Ulid, 2006)

Ülke	100 km <sup>2</sup> 'ye Düşen Hat Uzunluğu (km)	10000 Nüfusa Düşen Hat Uzunluğu (km)	Yolcu Trafiğindeki Demiryolu Payı (yolcu*km, %)
AB	5.2	4.3	6.3
Japonya	5.3	1.6	26.8
Fransa	5.8	5.4	9.5
Almanya	10	4.3	7.8
Kore	3.1	1.5	8.2

Hâlihazırda yenilikçi çözümler, hızlı ilerleme ve değişime haiz türler arası teknolojiler ve prosedürler için bir gerekliliktir. Bununla beraber söz konusu ilerlemeler gerekli düzenlemeler ile teşvik edilmelidir.

Yüksek hızlı demiryolları özellikle de ekonomik açıdan, 200-500 km arası mesafelerde havayolu ve karayolu ulaştırma türlerinden daha rekabetçi bir düzeydedir. 2023 vizyonu dâhilinde başta demiryolu ulaştırma türü olmak üzere oldukça kapsamlı ve nitelikli hedefler belirlenmiş olup yakın vadedeki hedef ise 1700 km'lik yüksek hızlı demiryolu hattının inşa edilip işleme alınmış olmasıdır. Ülkemizde demiryolları, ulaştırma tarihi süreci içerisinde 50 yıllık bir süreçte adeta kendi devri daimini ve servisini dahi sağlayamayacak düzeyde ihmal edilmiştir. Örneğin söz konusu süreçte 1950-2002 yılları periyodunda demiryolu ağ uzunluğu sadece %11'lik bir artış göstermiş iken karayolu ulaştırma türü ağ uzunluğu ise aynı dönemde %80'lik bir büyüme ortaya koymuştur (Vickerman ve Ulid, 2006).

### 4. Deneysel Sonuçlar(Experimental Results)

Demiryolu ulaştırma türünde altyapı ve işletme açısından hem mevcudun rehabilite edilememesi ve hem de yenilerinin inşa edilememesi nedeni ile 1950 yılında yolcu ve yük taşımacılıklarında sırası ile %42 ve %68 olan türel paylar 2010 yılı itibari ile %1,6 ve %4,5'e gerilemiştir. Ülkemizde demiryollarında ciddi bir kaynak aktarımı özellikle 2003 yılı itibari ile başlayan ulaştırma politikalarının neticesinde olgunlaşmış sonuç vermeye başlamıştır. Bu çerçevede ilk olarak Ankara-Eskişehir Yüksek Hızlı Demiryolu hattı projesi tamamlanıp yüksek hızlı tren işletimine geçilmiş, geçmişte olduğu gibi demiryollarının başat konumuna erişmesi için ciddi anlamda demiryolu yatırımları yapılarak devreye alınmıştır.

**Tablo 4.** 2023 Yılı Beklenen Yük Taşımacılığı Projeksiyonları ve Demiryolu Sektörünün Payı (Estimated Freight Transport Projections and Railway Sector Shares For 2023) (ITU, 2006)

Yük Taşımacılığı				
	2011 Yılı		2023 Yılı	
	Miktar (milyar ton*km)	Oran	Miktar (milyar ton*km)	Oran
Ulaştırma Sektörü	275	100	625	100
Demiryolu	11.7	4.3	95	15

Türkiye'nin 2023 yılı vizyonunda öngörülen; %7 yıllık ortalama büyüme oranı, 500 milyar ABD Doları ihracat hedefi, 1,9 trilyon ABD Doları GSMH hedefi, 84 milyon nüfusu ve kişi başına düşen 23500 ABD Doları hedefi dikkate alınarak yapılan yolcu ve yük taşıma projeksiyonları ile demiryolu sektörünün payı aşağıda verilmiştir. Aşağıda Tablo 4'te ülkemizdeki yük taşımacılığı projeksiyonları ortaya konmaktadır. Tablo 5'te ise ülkemizdeki yolcu taşımacılığı projeksiyonları 2023 yılı için verilmektedir (ITU, 2006).

**Tablo 5.** 2023 Yılı Beklenen Yolcu Taşımacılığı Projeksiyonları ve Demiryolu Sektörünün Payı (Estimated Passenger Transport Projections and Railway Sector Shares For 2023) (ITU, 2006)

Yolcu Taşımacılığı				
	2011 Yılı		2023 Yılı	
	Miktar (milyar ton*km)	Oran	Miktar (milyar ton*km)	Oran
Ulaştırma Sektörü	248	100	500	100
Demiryolu	5.9	2.4	50	10

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Türkiye'de demiryoluna geçişin gerekliliği anlamında birçok sebep vardır. Ancak bunlardan en öne çıkanlardan birisi de Türkiye'nin de kapsamında olduğu uluslararası anlaşmaların kimi çevreci öncelikleri kapsamına almış olmasıdır. Bu yaklaşımlar da demiryolları başta olmak üzere çevre dostu ulaştırma türlerini öne çıkarmakta olup bu eğilimin sağlanması yüksek hızlı demiryolları başta olmak üzere demiryolu yatırımlarının etkin ve talep çekici bir hüviyete yönelik gerçekleştirilmesi ile mümkün olabilecektir. Gelişmiş ülkelerde de görüldüğü gibi, demiryollarında serbestleşme ve özelleştirmenin yasa dayanak kazanması, sisteme özel sektör bileşenlerini de dâhil etmekte olup dolayısı ile de demiryolu rekabetçiliği hizmet parametreleri paralelinde artış göstermekte ve söz konusu ulaştırma türünün pazar payı da büyümektedir. Mevcut durumun, özellikle de sorunların doğru belirlenip tanımlanması gelecek perspektifi ve stratejilerinin de doğru tayinini sağlamaktadır. Dolayısı ile hâlihazırdaki dar boğazların ortadan kaldırılması hususu da gelecek projeksiyonlardaki yerini almalıdır (Vasanen, 2012).

Bu bağlamda Türkiye ilk olarak Ankara-Eskişehir-İstanbul ve Ankara-Konya yüksek hızlı demiryolu (YHD) projelerini devreye almıştır. Hâlihazırda, İstanbul-Edirne, Ankara-Yozgat-Sivas ve Ankara-Afyon-Manisa-İzmir ile Eskişehir-Bilecik-Bursa (Yenişehir)-Balıkesir (Bandırma) yüksek hızlı demiryolu (YHD) projelerinin inşası sürmektedir. Türkiye'nin desteği ile 2017 yılı itibarı ile Bakü-Tiflis-Ahıska-Kars yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattı işleme alınmış olup Ankara-Yozgat-Sivas-Erzurum-Kars yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattı tamamlandığında İstanbul'dan Bakü'ye kadar yüksek hızlı demiryolları (YHD) ile kesintisiz erişim sağlanacaktır. Yine Yunanistan'a bağlanan İstanbul-Edirne yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattı da bittiğinde, bu kez Selanik-Bakü arası yüksek hızlı demiryolu (YHD) hizmeti temin edilmiş olacaktır (Camagni, 2009). İşte bu sistemin en önemli halkası Marmaray olacaktır. Daha geniş perspektiften bakıldığında ise Pekin'den Londra'ya İpek Demiryolunun merkezinde olan da yine Marmaray'dır. Yine yapılan projelere bakıldığında, Ankara-Çankırı-Samsun ve Ankara-Konya-Karaman-Mersin yüksek hızlı demiryolu (YHD) hat projeksiyonları dikkate alındığında, ülkemizde Ankara merkezli olarak kuzey, güney, doğu ve batı istikametlerinde bir yüksek hızlı demiryolu (YHD) ağ planlaması olduğu da görülmektedir (Golobič ve Marot, 2011).

Bu bağlamda Türkiye'nin de 2023 vizyonu dâhilindeki hedeflerine ulaşabilmesi için aşağıdaki hususlara erişilebilirlik, dakiklık, hız, konfor bağlamında öncelik verilmesi gerekmektedir (9.Kalkınma Planı, 2012).

- ✓ Mevcut demiryolu ağı yolcu ve yükte geliştirilmeli,
- ✓ Rekabetçiliğin artırılması için gerekli yasal ve işletimsel unsurlar harekete geçirilmeli,
- ✓ Mevcut altyapı iyileştirilmeli, genel standartlar arttırılmalı,
- ✓ Demiryollarındaki büyüme araçlara da nitelik ve nicelik olarak yansıtılmalı,
- ✓ Demiryolu hatları içerisinde elektrikli ve sinyalli hatların oranı arttırılmalı,
- ✓ Türler arası rekabet ve entegrasyonun temininde gerekli koşullar sağlanmalı,
- ✓ Projelendirme koşul ve kısıtları da tekraren ele alınıp revize edilmeli,
- ✓ Doğrudan erişilebilirlik önemli yük aktarım merkezleri için sağlanmalı,
- ✓ Avrupa Birliği ile eşgüdüm bağlamında uluslararası ulaştırma koridorlarına entegrasyon sağlanmalı,
- ✓ Maliyetler; işletme ve bakım, onarım başta olmak üzere düşürülmeli,
- ✓ Personel sayısı özellikle uzman düzeyinde arttırılmalı,
- ✓ Yükümlülükler kamusal hizmetlerden başlayarak tanımlanmalı ve yerine getirilmelidir.

Entegrasyon ne kadar güçlü ve etkili kurulur ve bununla beraber de altyapı ihtiyaçları transit ağlarda temin edilir ise ulusal çapta coğrafi konumun da paralelinde ulaştırma sektöründe o kadar gelişim kat edilir (Veneri ve Burgalassi, 2012). Bununla birlikte demiryolu, özellikle de yüksek hızlı demiryolu yatırımları hâlihazırda sorunları azaltıcı nitelikte ve uluslararası seyahat sürelerini düşürücü etkinlikte tasarlanıp yapılmalıdır. Bu noktada eğer Türkiye'nin sahip olduğu doğal konum potansiyelini başka bölge ülkelerine kaptırması istenmiyor ise ivedilik ile hareket edilmelidir.

### **Teşekkür (Acknowledgement)**

Bu çalışmada moral desteklerinden dolayı Yahyâ Âlparıslan Kızıltaş'a teşekkür ederim.

### **Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)**

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

### **Kaynaklar (References)**

- Agarwal, O.P., 2001. "Towards a National Urban Transport Policy". Indian Journal of Transport Management, 25(6), 593-616. Sustainable Development, [http://www.uic.asso.fr/railisa\(12.08.2012\)](http://www.uic.asso.fr/railisa(12.08.2012))
- Bussieck M.R., Kreuzer P., Zimmermann U.T., 1997. "Optimal Lines for Railway Systems". European Journal of Operational Research, 96(1), 54-63.
- Camagni, R., 2009. Territorial Impact Assessment for European Regions: A Methodological Proposal and An Application to EU Transport Policy. Evaluation and Program Planning, 32(4), 342-350. doi:10.1016/j.evalprogplan.2009.06.014
- Golobič, M., Marot, N., 2011. Territorial Impact Assessment: Integrating Territorial Aspects in Sectoral Policies. Evaluation and Program Planning, 34(3), 163-173. doi:10.1016/j.evalprogplan.2011.02.009.
- Istanbul Technical University (ITU), 2006. "Estimation of Freight and Passenger Transportation in Turkey". Second Report.
- Miyako A., Yamamoto Y., 1997. "Investigation of Running Resistance of High Speed Trains". World Congress of Railway Research WCRR, 97, 577-579.
- Takatsu T., 2007. "The History and Future of High-speed Railways in Japan". Japan Railway & Transport Review, 48, 6-21.
- Vasanen, A., 2012. Functiona lpolycentricity: Examining Metropolitan Spatial Structure Through the Connectivity of Urban Sub-centres. Urban Studies, 49(16), 3627-3644. doi:10.1177/ 0042098012447000
- Veneri, P., Burgalassi, D., 2012. Questioning Polycentric Development and Its Effects. Issues of Definition and Measurement for the Italian NUTS-2 Regions. European Planning Studies, 20(6), 1017-1037. doi:10.1080/09654313.2012.673566
- Vickerman R., Ulid A., 2006. "Indirect and Wider Economic Impacts of High Speed Rail". Economic Analysis of High Speed Rail in Europe, 1, 89-118.
- Wiewel, W., Persky, J.J., 2015. Suburban Sprawl: Private Decisions and Public Policy. Routledge.
- Wong, W.G., Han, B.M., Ferreira, L., Zhu, X.N., Sun, Q.X., 2002. "Evaluation of Management Strategies for the Operation of High-speed Railways in China". Transportation Research Part A: Policy and Practice, 36(3), 277-289.
9. Kalkınma Planı Ulaştırma Özel İhtisas Komisyonu (ÖİK). "Karayolu Alt Komisyonu Raporu". [http://ekutup.dpt.gov.tr/program/2006\(08.07.2012\)](http://ekutup.dpt.gov.tr/program/2006(08.07.2012))



## THE BASIC CONCEPTS OF MICRO-MILLING PROCESS AND ITS REVIEW IN TERMS OF DISTINCTIVE PARAMETERS

Luqman Khaleel Haydery ALATRUSHI<sup>1</sup>, Fevzi BEDİR<sup>2</sup>, Nihat YILMAZ<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Suleyman Demirel University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Mech Eng., Isparta, Turkey

<sup>2</sup> Gebze Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mech. Eng., Gebze, Turkey

<sup>3</sup> Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mech. Eng., Isparta, Turkey

### Keywords

*Micro-Milling,  
Cutting Forces,  
Surface Roughness,  
Burr Formation.*

### Abstract

The micro-milling process is relating to the production of miniature parts, and it is one of the significant micromachining processes. The size of parts produced by micromachining is smaller than millimeters and in the range of a few microns. In the last years, the demand for needs to minimal parts in industries, such as biomedical, communication, and aerospace have been increased. To encounter this need, one of the proper solutions is the micro-milling process. In this study, a review of the micro-milling process was achieved in terms of the important common terms and some concepts. Terms like size effect, minimum chip thickness, and ploughing phenomenon were evaluated with respect to literature. These terms can be taken into account to distinguish a major difference between micro and macro cutting processes. In addition to, surface quality is an important required factor for machined parts. In this work also the surface roughness and burr formation mechanism were showed because they represent an inevitable result in the micro-cutting process. In addition to the micro-milling process have been assessed in terms of important factors used in determining the quality of workpieces such as surface quality, burr formation, and cutting forces. In conclusion, this study investigated the important parameters in the micro-milling process and provided general information to compare the micro-milling with conventional milling.

## MİKRO FREZELEME İŞLEMİNİN TEMEL KONSEPTİ VE ÖZGÜN PARAMETRELER AÇISINDAN GENEL DEĞERLENDİRMESİ

### Anahtar Kelimeler

*Mikro Frezeleme,  
Kesme Kuvvetleri,  
Yüzey Pürüzlülüğü,  
Çapak Oluşumu.*

### Öz

Mikro frezeleme işlemi minyatür parçaların üretimi ile ilgilidir ve önemli mikro işleme proseslerinden biridir. Mikro işleme ile üretilen parçaların boyutları milimetreden daha küçük olup birkaç mikron mertebesindedir. Son yıllarda biyomedikal, iletişim ve havacılık gibi birçok endüstrilerde mini parçalara olan ihtiyaç artmıştır. Bu ihtiyacı karşılamak için en uygun çözümlerden biri mikro frezeleme prosesi ile üretim yöntemidir. Bu çalışmada, mikro frezeleme işlemi açısından öneme sahip yaygın terimler ve bazı kavramlar gözden geçirilmiştir. Boyut etkisi, minimum talaş kalınlığı ve kazınma fenomeni gibi terimler literatür ışığında incelenmiştir. Bu terimler, mikro ve makro kesme süreçleri arasındaki farkı göstermek için dikkate alınabilir. Çalışmada ayrıca işlenmiş parçaların kalitesini belirlemede kullanılan önemli faktörlerden; yüzey kalitesi, çapak oluşumu ve kesme kuvvetleri gibi parametreler açısından, mikro frezeleme işlemleri kritik edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma ile mikro frezeleme işlemindeki önemli parametreler incelenmiş ve mikro frezelemenin geleneksel frezeleme işlemiyle farkını ortaya koymak için genel bilgiler sunulmuştur.

### Alıntı / Cite

Alatrushi, L.K.H., Bedir, F., Yılmaz, N., (2020). The Basic Concepts of Micro-Milling Process and Its Review in Terms of Distinctive Parameters, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(2), 643-654.

\* İlgili yazar / Corresponding author: nihatyilmaz@isparta.edu.tr, +90-246-214-6794

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
L.K.H. Alatrushi, 0000-0001-6613-2848	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	19.07.2018
F. Bedir, 0000-0002-9202-3458	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	26.04.2020
N. Yılmaz, 0000-0002-8689-1048	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	06.05.2020
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

## 1. Introduction

In recent years, miniaturized components became a significant need in different industries such as electronics, biomedical, communication, and aerospace. The miniaturization in the micromachining process strongly will be enhanced the evolution in the technology and in a broad spectrum of producing components. The micromachining process requires reliable and frequent methods to achieve a high accuracy in the products. It has a higher production rate from the non-conventional manufacturing methods. In general, micromachining processes provide the products which have the range between a tens micrometer to a few millimeters in size. The definition of the micromachining process considers as one of a complex cutting process and many researches highlighted the specification of micromachining. Masuzawa and Tönshoff (1997) proposed if the undeformed chip thickness ranges from 0.1 to 200  $\mu\text{m}$ , so the cutting is under the micro process. Masuzawa (2000) acknowledged also that the micromachining definition varies according to the viewpoint of person, machining method and type of product and material. Liu et al., (2004) said that when the undeformed chip thickness during the cutting process is comparable to the tool edge radius then the cutting process is micromachining. Chae et al., (2006) defined micromachining as a productive way of miniature components and devices with size varied from tens of microns to a few millimeters. Dornfeld et al., (2006) they described the micromachining has a cutting tool diameter and feed less than 1 mm. Aramcharoen et al.; (2008) and Zhan et al., (2014) concluded that the micromachining process means the tool diameter falls in a range of 1 to 999  $\mu\text{m}$  and undeformed chip thickness is comparable to tool edge radius or material grain size. According to the above, the micromachining process is a transition technique between the meso and nano machining process as seen in Fig. 1. The micro-milling process is one of the common micromachining processes. It is similar to the conventional milling process in concepts of the cutting process, but it varies in size of the cutting tool. Mini cutting tool and mini tool machining is an inherent feature of the micro-milling process that comes from the miniaturization of components (Zhang et al., 2016).

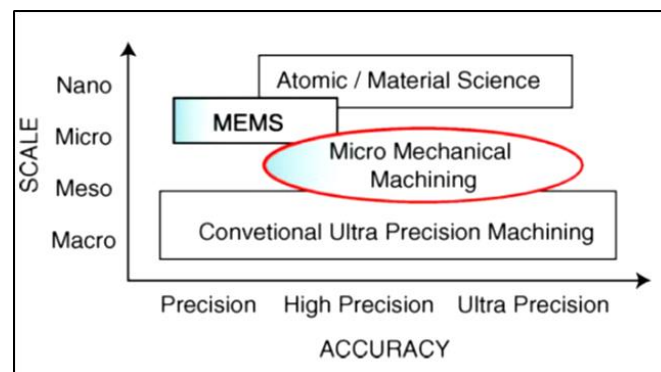


Figure 1. The size of dimension in micromachining processes (Chae et al., 2006)

## 2. Micro Machine Tool and High-Speed Spindles

The size and quality of micro-products depend on the properties of the machine tools, which used to produce miniaturized parts, including their overall accuracy and their dynamic performance. Micromachine tools have some advantages such as high rigidity, damping and the ability to operate perfectly based on precision sensors and actuators. Besides, micro-machine tools do not require for use in high production or to achieve the required accuracy only. On the other hand, miniaturization in terms of reducing in size, power, materials, and cost other usefulness be considered. Fig. 2 shows some micro machine tools (Bang et al., 2005; Okazaki et al., 2004; Kussul et al., 1996; Kussul et al., 2002).

Spindle considers an important part of micro machine tools. The rotational speed of spindle must be very high (air bearing spindles exceed 200,000 RPM) to maintain of product's efficiency and surface finishing because the chip removal rate is decreased with small tool diameter (Chae et al., 2006; Kim et al., 2014). Spindle considers an effective tool in the miniaturized cutting tool machine, it plays a significant role in terms of product size, surface quality and accuracy of machined parts. In addition, the quality of machined products will be affected directly by spindle motion error. The hydrostatic and aerostatic spindles are commonly used in micro cutting tools. They have the ability of high revolution speed and high precision of motion. The oil hydrostatic spindle has a high stiffness

than aerostatic, but it has low resistance against thermal deformation than the aerostatic spindle. In micro cutting tools, hydrostatic spindles are frequently used to apply the heavy load, but with medium loads, the aerostatic spindles are more suitable to use. A sufficient angular speed, torque, and power can be provided by the spindle drive. The spindle composes in feed drives in machine tools. It held in the spindle housing with bearings (Luo et al., 2005). The integrated single unit of spindle, shaft, and motor provide the stiffness and reducing the motion errors. The accurate and reliable spindle is required to achieve a high quality of products and accuracy of surface roughness (Venkatesh and Izman., 2007; Venkatesh et al., 2016). Jokiel et al., (2004) explored the development of new ultra-high-speed of micro-milling spindles. A novel air-bearing spindle design had been discussed in this study. It runs at very high speeds (450,000 rpm) and provides minimal run-out. Delhaes et al., (2009) mechanism of the new viscous drive has been applied and reached a high speed of 24,000 rpm. Zhou et al., (2015) a novel mechanism has been applied to improve the radial tool run-out of spindles. It has been performed the spindle speed of 125,000 rpm while a tool run-out recorded a 7.5  $\mu\text{m}$  (Gill et al., 2004). They designed a spindle that has a maximum speed of 500,000 rpm and a radial tool run-out of 25  $\mu\text{m}$ , it was an unique for micromachining.



Figure 2. Some examples of micro machine tools (Chae et al., 2006)

### 3. Micro Cutting Tools

In the micro-cutting process, cutting tools must have special properties to be able to achieve the cutting process under the mini cutting parameters and high speed. Cutting tool materials are classified by a different set of tool materials, because in cutting processes be needing a high resistance in special conditions such as high temperature, high stresses and high friction on workpiece surface by quick removal chip. As a result, Cutting tool materials must have a specific characteristic depending on the type of machining processes, machined workpiece material, and overall thermomechanical process conditions (Grzesik, 2008; Li et al., 2015). The most important features in cutting tool materials must be to have:

- Sufficient hardness at high temperatures to withstand abrasive wear.
- Sufficient resistance against the plastic deformation that happens under high stresses and high temperatures during chip formation. So to prevent the geometry of the cutting edge from plastic deformation
- High fracture toughness to prevent breakage and to resist edge micro chipping especially in interrupted cutting.
- High thermal conductivity to overcome from generated temperatures about the cutting edge.
- High stiffness that required to provide high accuracy.
- Sufficient lubricity to increase welding resistance and to prevent built-up edge formation.

In general, cutting materials must be had high resistance to wear (hard) and sufficient toughness to provide a long tool life for cutting tools. These two characteristics cannot be met together at the same time because of the hard materials are not tough in general and reciprocally (Fig. 3). This problem can be solved successfully by coating the cutting tool with a certain layer of especial and hard material. In micro-cutting machining, the commonly applied materials in addition to using a high-speed steels, CBN(carbon boron nitride), natural diamond-CD and synthetic diamond wheels-SD that have an excellent functional properties and long life (Golabzac and Koziarski, 2005). The following hard cutting materials can be categorized according to DIN ISO 513; tungsten carbide, cutting ceramics, diamond, boron nitride (Adams et al., 2004; Fang et al., 2003; Thepsonthi and Özel; 2013).

The common available micro-end mills that used in micro-milling can be as small as 50  $\mu\text{m}$  in diameter, with a helix angle fabricated by grinding. Fig. 4. depicts a typical two-fluted micro-end mill. The helix angle in the micro-milling tool must be very small to improve its rigidity (Schaller et al., 1999; Onikura et al., 2000).

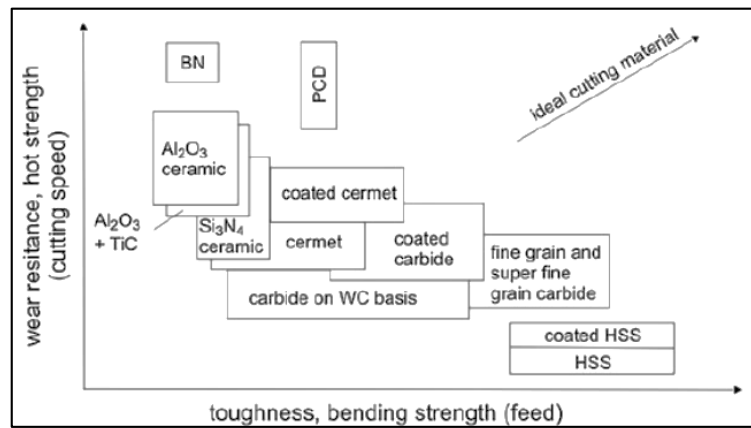


Figure 3. Cutting materials and their wear resistance and toughness (Thepsonthi and Özel, 2013)

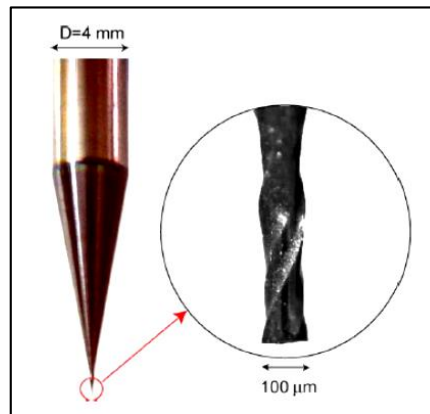
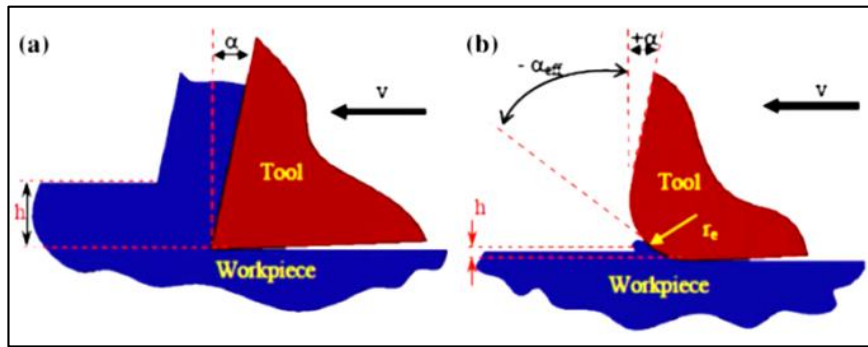


Figure 4. Tungsten carbide micro end mill with two flutes (Schaller et al., 1999).

In micro milling, tool wear and tool life, consider an important matter. Especially, when are used the hard and difficult materials in the cutting process. Elastic deformation of the tool, the round of edge cutting tool, abrasive wear, and breakage are the most encountered problems during micromachining. One of the significant ways to decrease or to overcome these problems is the coating cutting tool. The Coating materials can be contributed to improving the quality of the cutting process (Bouzakis et al., 2012). Many papers have studied the effect of coating materials on improving the micromachining. Uzun et al., (2013) used the coated micro end mills to cut the Inconel 718 superalloy during the micro-milling process. They concluded that coating materials of AlTiN, TiAlN + AlCrN and AlCrN have good results during the cutting process compared to coating materials of TiAlN + WC/C and diamond. Biermann et al., (2013) used AlCrN and TiAlN coated micro end mills to machine the austenitic stainless steel. As a result of the comparison, good surface quality and low tool wear have been obtained with AlTiN coated end mills. Aslantas et al., (2016) investigated the micro-milling process of Ti6Al4V alloy, they used the uncoated and nano-crystalline diamond (NCD) coated tools and TiN and AlCrN coated micro end mills during the cutting process. Poor surface quality and more burr formation were recorded by using uncoated and nano-crystalline diamond (NCD) coated tools.

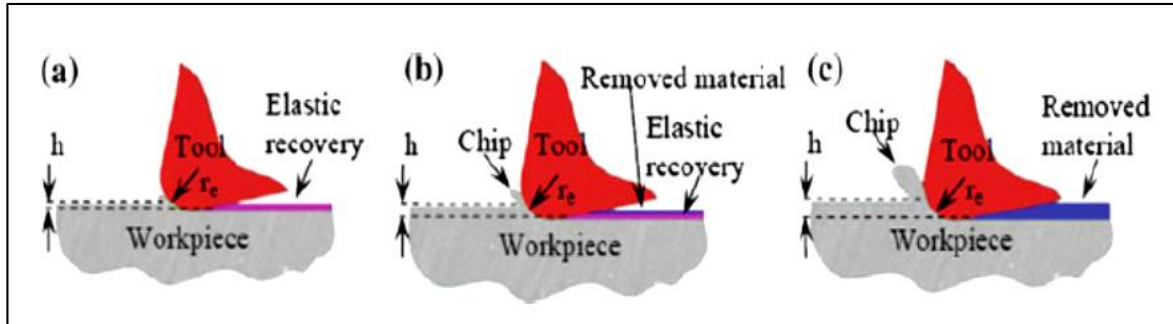
#### 4. Size Effect and Concept of Removed Chip

In micromachining including the micro-milling process, the size effect phenomenon means the comparability between the edge tool radius with undeformed chip thickness or to applied feed. The tool edge radius in micro-milling significantly affects the micro-cutting process, the opposite of macro machining which the cutting tool edge radius considers as a sharp. Fig. 5. shows the difference between micro and macro cutting process in terms of cutting tool edge radius and uncut chip thickness. In micro-cutting process is usually the uncut chip thickness less than the tool edge radius and the chip forms in the zone of the cutting tool edge radius. Fig. 5.b) shows clearly the existence of the negative rake angle and the relative bluntness of the tool, which plays an important role in increasing the specific cutting forces (Saedon et al., 2016; Vogler et al., 2002; Shaw, 1995).



**Figure 5.** Effect of cutting edge radius to chip thickness a) in macro cutting b) in micro-cutting (Saedon et al., 2016)

The minimum chip thickness  $h_{min}$  is specified as the critical value that to be comparable to minimum uncut chip thickness, which removed from a work surface at a cutting edge. In macro machining, in general, the depth of cut is greater than the cutting tool edge radius, and the removed chip from the work surface generates by cutting tool. While in micromachining, the cutting happens at a round of tool edge. The small depth of cut compared to the tool edge radius that causes a large negative rake edge. In this case, the cutting process may be dominated by rubbing and compression instead of removing the chip. This phenomenon is called a ploughing. Ploughing phenomenon causes an elastic recovery of the workpiece, bad surface quality, high cutting forces and increases the possibilities tool damages to happen in the cutting region. The mechanism of chip formation in the micro-cutting process is shown in figure6. Three different cases happen during the cutting process. Figure 6a. shows the first case when the uncut chip thickness is less than a critical minimum chip thickness  $h_{min}$ , so the chip cannot be formed and the tool cannot remove any material. The second case that shown in figure 6b. Here, the uncut chip comes near to the minimum chip thickness  $h_{min}$ , so the chip will be started to form by shearing but at this time still, some elastic deformation exists. In the third step, when the uncut chip thickness increases further than the minimum chip thickness  $h_{min}$ , here, the elastic deformation becomes lessen and the chip is removed completely as shown in Fig.6.c). Finally, it can be said when the ratio of the depth of cut to tool edge radius less than 1, so the chip cannot be formed and material cannot be deformed (Schmitz et al., 2002; Furukawa and Moronuki, 1988; Lucca et al., 1991; Aramcharoen and Maivenga, 2009; Uzun et al., 2010; Uzun et al., 2013).



**Figure 6.** Comparison between chip thickness and chip formation in the micro-cutting process a.  $h < h_{min}$ , b.  $h \approx h_{min}$ , c.  $h > h_{min}$  (Saedon et al., 2016).

## 5. Determination of Minimum Chip Thickness

In micromachining processes, including the micro-milling process, the minimum chip thickness is essential in the concept of the cutting process, and the main distinctive factor between macro and micro-cutting process. The minimum chip thickness is relating to the cutting tool radius and this relationship based on the cutting tool edge radius and the workpiece material. During the cutting process, it is very difficult to determine the minimum chip thickness directly, although the possibility to know the tool edge radius (Vogler et al., 2004). The researchers have found the minimum chip thickness by applying finite element (FE) or by experimental works. Vogler et al., (2004) concluded the minimum chip thickness is 0.2 and 0.3 times the edge radius for pearlite and ferrite respectively by using FE simulation for tool steel. Moriwaki et al., (1993) used the FE way to find the minimum chip thickness value with impact the cutting tool radius in the micro-milling process by using the diamond tool to cut a workpiece of copper. The data of FE proved a good agreement with experimental results. Liu et al., (2003) in their work, investigated experimentally chip formation and cutting forces in the micro-milling process. They proved that a sudden change in cutting forces could be indicated to find the minimum chip thickness. This sudden change in cutting forces was considered a transition from ploughing forces to shearing forces as shown in Fig. 7.



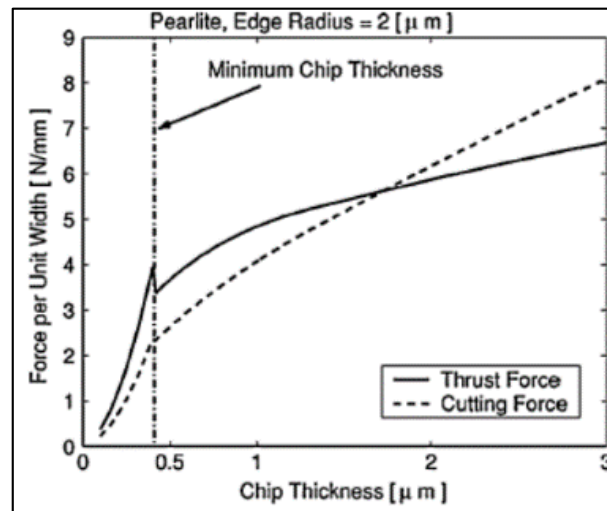


Figure 7. Chip load with cutting forces for pearlite (Liu et al., 2004).

Son et al., (2005) proved the minimum chip thickness has been affected by the friction between the workpiece and cutting tool, i.e. depends on work materials. They also said that a continuous chip is formed at the critical chip thickness, and producing the best surface quality.

## 6. Cutting Force in Micro Milling

In the micro-milling process, it is very important to control the cutting force due to the breakage of the cutting tool easily. Control of cutting force also results in a better tool life and good surface quality. The most important influencing factors on the cutting force are the cutting tool edge radius because the increasing of edge radius causes difficulty the tool to engage into the workpiece and increases the cutting forces. In addition, the minimum chip thickness, cutting speed, workpiece material, and tool wear are affecting cutting force during the cutting process. In the micro-milling process also, the generated cutting force has a similar character in general with conventional milling, but different in terms of the chip formation mechanism, which causes the shear characteristics to change. Also, because of the cutting force in micro-milling directly relates to chip formation and limits to feed rate. Cutting force also can be determined the tool deflection and bending stress which occurred during the cutting process. In micromachining also, the generated negative rake angle in the cutting edge due to size effect causes instabilities in the cutting force (Chae et al., 2006; Vogler et al., 2004; Bulgurcu, 2017). There are two forces to be considered in terms of the mechanism in the micro-milling process, these are it can be named as ploughing force and shearing force. An available sharp-edged phenomenon in the conventional cutting process cannot be applied in the micromachining process because the chip thickness in micromachining applications can be compared with an edge radius of the tool in size, also due to the large negative rake angle of the cutting tool. The occurred elastic-plastic deformation of the workpiece also changes the cutting force (Kim et al., 2004; Budak, 2000; Dow et al., 2004).

Liu et al., (2004) found through the application of various feed rates during the micro-milling process, cutting force be changed obviously, and the reason belongs to the elastic recovery of the workpiece and the vibration of the tool. As a result, they concluded during the cutting process at low feed rate, cutting be instable and met to ploughing phenomenon. Mamedov and Lazoğlu (2012) in their work, cutting was performed using Al7050, an engineering material in micro-milling, and a 1.5 mm uncoated Tungsten carbide (WC) cutting tool was used. The apparent effect of cutting forces on tool wear and final surface quality has been investigated. A force model is presented in terms of the cutting forces and the mechanics and dynamics of the cutting process. As a result, the accuracy of the presented force model proved to be better under various cutting conditions. Zhang et al., (2016) in their study, cutting forces were investigated in the micro-milling process by using Al6061 as a workpieces and a carbide cutting tool with two flutes. To estimate the general three-dimensional cutting force components, the size effect, tool run-out, and tool deflection were taken in accounted and presented in the proposed analytical estimation model. The parameters of tool run-out and tool deflection were taken from the experimental part. The results of the predictive model has been appropriated the results of experimental work very good.

Campos et al., (2017) in their study, a model of a mechanical cutting force, which adapted 6351-T6 aluminum alloy in micro-milling process was applied, without regard to homogeneous grain characteristics and tool run-out. Cutting forces experimentally were analyzed, taking into account the different feed rates and cutting speeds. This model uses a calibration method depending on the experimental data obtained for calculating the specific cutting force. The model is valid for the cutting process and cutting parameters that performed. As a result, the effect of the feed per tooth and cutting speed on the cutting forces is higher. The mechanical model confirmed this result.

The mode of specific cutting force can be used for future experiments and considered a good estimated mode with error below 15%. Kuram (2017) in his study, the effect of tool attachment length and burr formation on cutting force through the micro milling process of Inconel 718 superalloy was investigated. The different experiments were carried out with a constant number of revolutions, feed, and depth of cut. The tool attachment length of the cutting tool was selected as 10, 15 and 20 mm. Average forces in the x and y directions were recorded. As a result, it has been found that  $F_x$  force is greater than  $F_y$  force at all cutting tool attachment heights. Both  $F_x$  and  $F_y$  force increased with increasing cutting tool height as shown in Fig. 8.

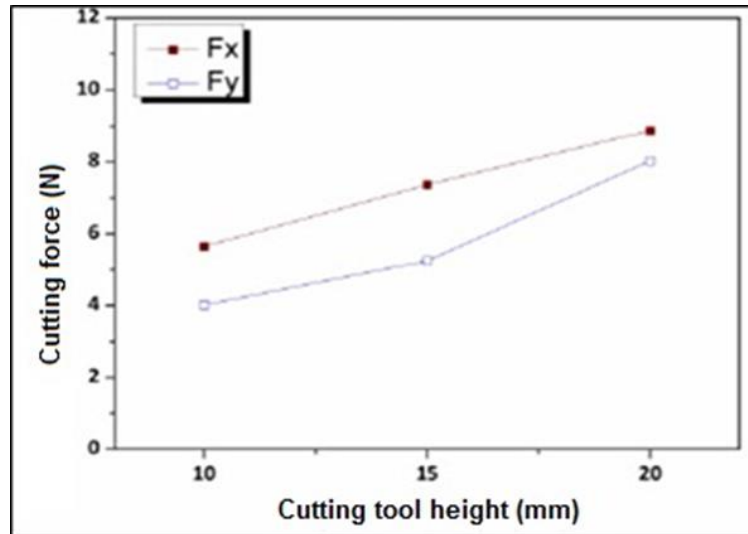


Figure 8. Effect cutting tool attachment height on cutting force (Kuram, 2017).

## 7. Surface Quality and Burr Formation

At the end of the micro-milling process, surface roughness and accuracy are the most important parameters which provide the quality of the product. In conventional manufacturing processes, additional processing after manufacturing can increase the surface quality of the produced part. Nevertheless, in micro-milling, this is somewhat different and more complex than the macro milling (Wu, 2012; Wang et al., 2016; Wu et al., 2017). Because of the miniature products, having a very small geometric structure and may not be suitable for an additional surface finishing operations. Therefore, in micro-milling, it is important to define the surface formation and the effective parameters on this formation. In the micro-milling process, the most important factor affecting surface quality is the minimum chip thickness. The effect of minimum chip thickness on surface characterization draws attention to many researches (Yuan et al., 1996; Bissacco et al., 2006; Shreyes and Melkote, 2006; Li et al., 2008). The roughness value increases with large values of the depth of cut and feed per tooth (Liu et al., 2003; Weule et al., 2001). On the contract, the low number of revolutions of the cutting tool causes the poor in surface quality due to ploughing phenomenon. Besides, the surface roughness significantly changes with tool geometry. Tool wear causes to change in tool geometry and will, in turn, lead to an increase in roughness values (Lee and Cheung, 2001; Schmitz et al., 2007; Makki et al., 2009). The generated burr formation after machining considers in terms of cleaning and additional processes with high costs undesirable cases. In the conventional milling process, the burrs formed after the manufacturing and it can be cleaned by the additional process. Although the formed burrs in the micro-milling are smaller in size than that deformed in the conventional milling process, the deburring process is more difficult than the conventional milling process (Venkatesh and Izman, 2007; Lee and Dornfeld, 2005; Filiz et al., 2007). During the micro-cutting process, it is very necessary to be taken into account the issue of burr formation and to reduce it to a minimum level (Wan et al., 2013; Afazov et al., 2013). For this, in particular, it is necessary to try to prevent the factors that affect tool wear and residual stresses (Venkatesh et al., 2016).

Many studies about the effect of the cutting parameters on burr formation and surface qualities have been done. Cutting speed, depth of cut, and feed rate as a cutting parameter in terms of the effect on burr formation was investigated for variable Works. Kim et al., (2014) studied in this work the effect of cutting parameters on the burr formation during the micro-cutting process for titanium alloy. The large amount and irregular burrs have been noted with a low feed rate (about  $1\mu\text{m}/\text{tooth}$ ), on the other, hand they founded that is no significant effect of cutting speed on burr formation. Thepsonthi and Özel (2012) in their study, many experiments were applied during the micro-cutting process of Ti-6Al-4V alloy to study the behavior of burr formation and surface quality with using different cutting parameters. They founded the substantial effect of burr formation is the depth of cut, and the substantial effect of surface quality is the feed rate.

## 8. Tool Wear

Tool life is a very important issue since cutting tools used in manufacturing processes and it directly affects product quality and cost. The long life of the cutting tools depends on their good abrasion resistance while maintaining their hardness and chemical stability at high temperatures. The size effect in micromachining, especially, the small depth of cut causes the increasing of friction between the cutting tool and machined parts that leads to high temperature and wear. In micro-cutting processes, flank wear and the rounding of tool edge are the most visible. Also, the abrasive wear, adhesive wear, and breakage of cutting tools are the most types of damage. The phenomenon of cutting tool edge and the wear measuring in the micro-scale cutting process are still challenging due to the miniaturization of the cutting tools. Consequently, the quality of the products affected by the increase of tool edge radius (Karubea and Soutomeb, 2003; Perçin et al., 2015; Wu,2012).

The most important effect of the tool wear in the micro-cutting process is the alteration in cutting tool diameter and edge radius which is formed due to the environmental and axial wear that occurs on the cutting tool. As a result, it leads to changes in cutting tool geometry. The environmental wear around the tool creates an increase in edge radius and a decrease in tool diameter. In the micro-milling process, the swift wear of the edge radius of the cutting tool is a critical process, because it directly affects the surface roughness, cutting forces and burr formation. In particular, burr formation in micro-milling increases with tool wear (Özel et al., 2017; Aslantaş et al., 2016; Hatipoğlu and Budak, 2014; Zareena and Velhuis, 2012). Dadgari et al., (2018) studied the relationship between the tool wear of the cutter and the cutting force, the variable cutting speeds have been used during the micro-milling process of Ti-6Al-4V alloy. The flank face of tool subjected to different wear rates against different cutting speeds, and along the cutting tool edge, non-uniform wear has been monitored. Wear average length for each tool flank when cutting length slot of 360mm during apply the different speed has been recorded by Figure 9. In this figure can be noted the average flank wear increased linearly for all cutting velocities, while the Figure 10 represents the SEM image of the flank face of cutting tool milled during altered cutting velocities. It is clearly in this figure, an adhesive wear has been indicated due to coherence of the specimen material, and at the low cutting velocity, the occurred flank wear is low also, although built-up edge forming is directly affected by cutting temperature. As known as the increasing of cutting speed leads to increase the cutting temperature, but it has been noted a small wear rate at high cutting speeds.

In micromachining, it must be understood the interaction between cutting force and tool wear, to ensure a good quality of parts and to provide its requirement, particularly, when hard materials are cut such as stainless steel, titanium alloys, etc. Some researchers like Oliaei et al., (2015) studied the impact of tool wear on cutting forces and surface quality in the micro-milling process. Stavax stainless steel is used as a workpiece. The outputs of this article were recorded with two conditions of the cutting tool (sharp and worm) as shown in Figure 11. Different cutting parameters were applied during the cutting process and optimal parameters were determined. The experimental and theoretical results showed increasing values of cutting force with a worm cutting tool as compared with a sharp cutting tool as shown in Figure 12. Besides, it was noted that surface roughness values were high with a worm cutting tool.

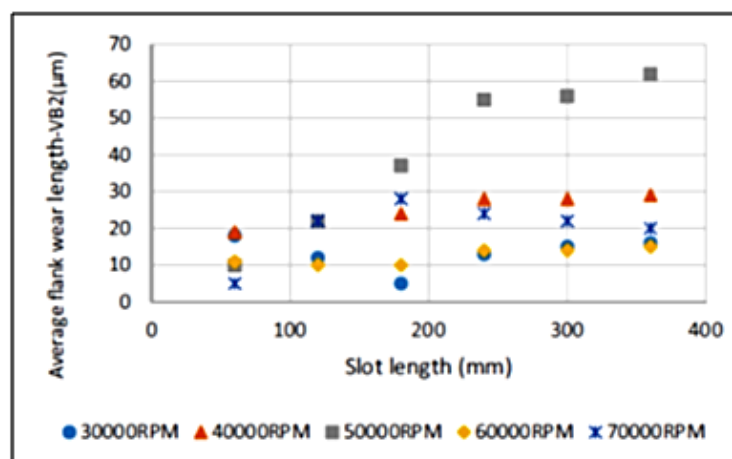


Figure 9. Effect of variable cutting speed on flank wear in cutting tool (Dadgari et al., 2018).

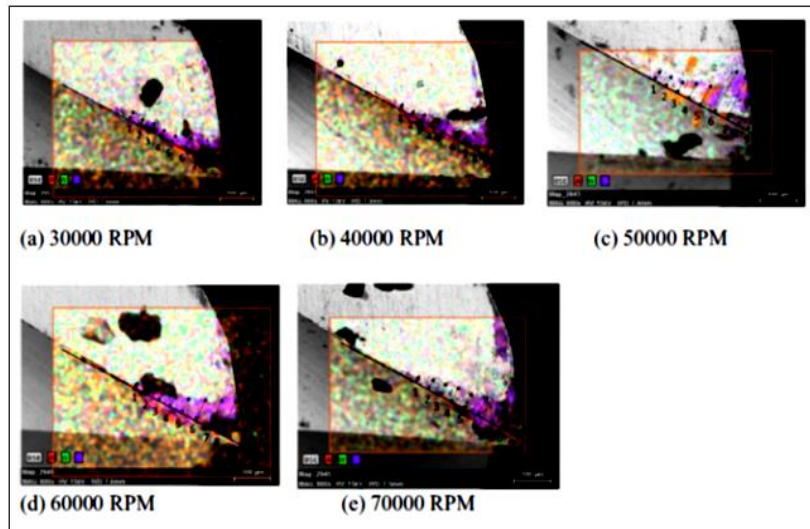


Figure 10. Flaks wear SEM images of the cutting tool after 360mm length machining (Dadgari et al., 2018).

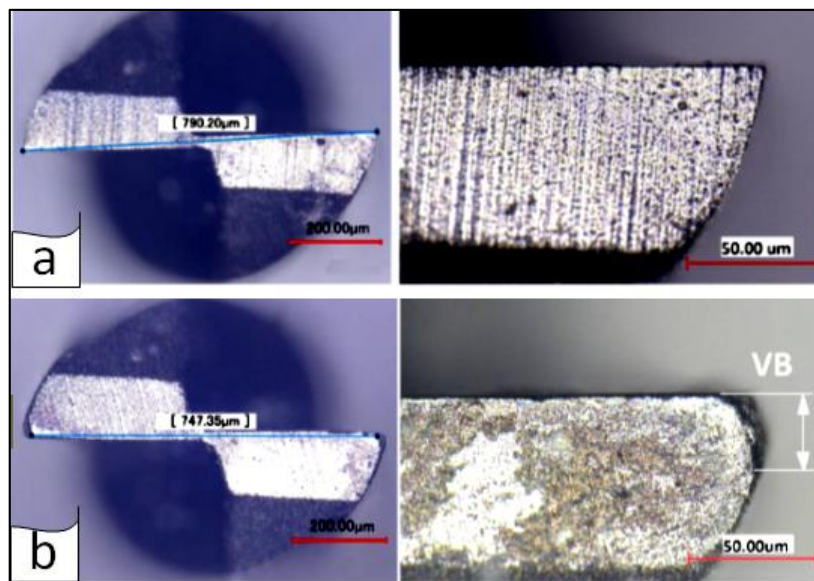


Figure 11: The mages of sharp and worm edges of cutting tool (Oliaei and Karpas, 2015).

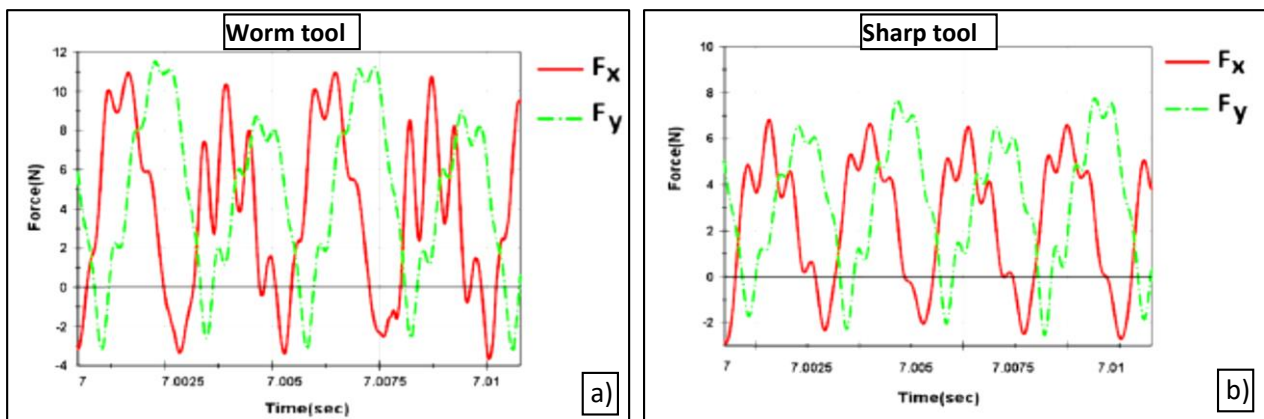


Figure 12: Different Values of cutting forces in the condition of a) the worm and b) sharp cutting tool (Oliaei and Karpas, 2015).

Wu et al., (2015) used the specific cutting force and the analysis of surface roughness to study the relationship between the minimum chip thickness and effective rake angle in the micro-cutting process. They determined the minimum chip thickness at which below it, the specific cutting force increased progressively and the surface quality is very poor.

## 8. Conclusion

Micromanufacturing systems are seen as the preferred technology for component miniaturization, and it contributes to enhancing economic growth, health, and living standard. The manufacturing of miniaturized components became a big challenge among the workers in this domain. Micromechanical cutting considers as a bridge in terms of size between the macro-micro range. The manufacturing process by the micro-milling process contributed to technology sectors greatly and became a significant competition among the researchers. The micro-end milling processes compared with other processes it has the flexibility and efficiency of using carbide tools and provides the convenience to fabricate mini parts. This work concentrated on some concepts and differences between the macro and micro-cutting processes, although in some cases the removal of the material showed similar direction during machining between them, such as tool wear and chip formation. However, to provide good accuracy and high productivity in the micro-milling process, some factors must be taken into account such as cutting tool characteristics, material properties, cutting force predictions, assembly, modeling, and testing. Also, the minimum chip thickness and its effect on the cutting process are the attractive result and its determination value still a complex issue. The micro-milling process is a proper manufacturing method to support the development in different areas of technology. Micro milling process provides an accuracy, low cost, miniaturized parts, processes of 3D models using ferrous alloys. This work resulted that the investigation of micro-cutting processes is required for more efforts to be able to answer and to discuss the encountered complicated challenges. Generally, in the micro-milling process, chip thickness must be greater than a critical chip thickness to improve the surface quality of products and with maintaining the specimen or tool below the limit of plastic deformation. In addition, the cutting tool geometry can be designed as appropriate for the concept of the micro-cutting process, especially in terms of strength and stiffness to ensure the formation of chips and a regular cutting process. Also, according to the studies done in this field, coated mill ends can be helped and raised the surface qualities of the product. Tool wear effect on cutting forces and surface roughness is unfavorable.

## Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

## References

- Adams, D., P., Vasile, M., J., Benavides, G., A., Cambel, N., I., 2004. Micro milling of metal alloy with focused ion beam-fabricated tools. *Journal of International Societies of Precision Engineering and Nanotechnology* 25, 107–113.
- Afazov, S.M., Zdebski, D., Ratchev, S.M., Segal, J., Liu, S., 2013. Effects of micro-milling conditions on the cutting forces and process stability. *Journal of Materials Processing Technology* 213, 671– 684, UK
- Aramcharoen, A., Mativenga, P. T., Yang, S., Cooke, K. E., and Teer, D. G., 2008. Evaluation and selection of hard coatings for micro-milling of hardened tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48 (14) 1578–1584. UK
- Aramcharoen, A., Mativenga, P., T., 2009. Size effect and tool geometry in micro-milling of tool steel. *Precision Engineering* 33, 402–407.
- Aslantas, K., Hopa, H., E., Percin, M., Uçun, I., Çiçek, A., 2016. Cutting performance of nanocrystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy. *Precision Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.01.009>
- Aslantas, K., Hopa, H.E., Perçin, M., Uçun, I., Çiçek, A. 2016. Cutting performance of nanocrystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy. *Precis. Eng.*, 45, (55–66).
- Biermann, D., Steiner, M., Krebs, E. 2013. Investigation of Different Hard Coatings for Micro milling of Austenitic Stainless Steel. *Procedia Cirp.*, 7, 246–251.
- Bissacco, G., Hansen, H.N., and De Chiffre, L., 2006. Size Effects on Surface Generation in Micro Milling of Hardened Tool Steel. *Annals of the CIRP*, 55(1), 593-596.
- Bouzakis, K.D., Michailidis, N., Skordaris, G., Bouzakis, E., Biermann, D., M'Saoubi, R. 2012. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods, and performance optimization. *CIRP Ann.*, 61, 703–723
- Budak, E., 2000. Improving productivity and part quality in milling of titanium-based impellers by chatter suppression and force control. *Annals of CIRP* 49, 31–36.
- Bulgurcu, G., 2017. Selection of Micromilling conditions for improved productivity and part quality. Graduate School of Engineering and Natural Sciences Sabancı University, M.Sc Thesis, 95p, Türkiye.
- Campos, F.O., Mougó, A. L., Araujo, A. C., 2017. Study of the cutting forces on micro-milling of an aluminum alloy. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 39:1289–1296.
- Chae, J., Park, S.S., Freiheit, T., 2006. Investigation of Micro-Cutting Operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 313-332.
- Dadgari, A., Huo, D., Swailes, D., 2018. Investigation on tool wear and tool life prediction in micro-milling of Ti-6Al-4V. *Nanotechnology, and Precision Engineering*, 218–225.
- Delhaes, G.M.J., Beek, A., vanOstayen, R.A.J., Munnig Schmidt, R.H., 2009. The viscous driven aerostatic supported high-speed spindle. *Tribol. Int.* 42(11/12), pp 1550–1557, Netherlands
- Dornfeld, D., Min, S., Takeuchi, Y., 2006, Recent Advances in Mechanical Micromachining. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 55,745-768.

- Dow, T., A., Miller, E., L., Garrard, K., 2004. Tool force and deflection compensation for small milling tools. *Precision Engineering* 28, 31–45.
- E. Kussul, T. Baidyk, L. Ruiz-Huerta, A. Caballero-Ruiz, G. Velasco, L. Kasatkina, 1996. Micromechanical engineering: a basis of the low-cost manufacturing of mechanical microdevices using micro equipment. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 6 (10–425).
- E. Kussul, T. Baidyk, L. Ruiz-Huerta, A. Caballero-Ruiz, G. Velasco, L. Kasatkina, 2002. Development of micro machine tool prototypes for micro-factories. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 12, 795–812.
- Fang, F., Z., Liu, H., Wu., Liu, X., D., Y.C., Ng, S.T., 2003. Tool geometry study in micromachining. *Journal of Micromechanics and Micro engineering* 13 726–731.
- Filiz, S., Conley, C.M., Wasserman, M.B., Özdoğanlar, O.B., 2007. An Experimental Investigation of Micro Machinability of Copper 101 Using Tungsten Carbide Micro Endmill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 1088–1100, USA
- Furukawa, Y., Moronuki, N., 1988. Effect of material properties on ultra-precise cutting process. *Annals of CIRP*, 37 (1), 113–116
- Gill, DD., Jr., BJ., Ziegert, JC., Payne, SWT., Pathak, JP., 2004. Next-generation spindles for micro-milling. Report by Sandia National Laboratories
- Gołabczak, A., Koziarski, T., 2005. Assessment method of cutting ability of CBN grinding wheels. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, 1256–1260
- Grzesik, W., 2008. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials Theory, Modelling, and Applications*. pp 478, Elsevier Science, Netherlands.
- Hatipoğlu E. ve Budak E., 2014. Mikro Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Yüzey ve Talaş Oluşumuna Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Türkiye
- Jokiel, Jr., B., Gill, D., D., Ziegert, J., C., Payne, S., W., T., Pathak, J., P., 2004. SAND 6445, Unlimited Release, Report
- Karubea, S., Soutomeb, T., 2003. The effect of tool nose radius in ultrasonic vibration cutting of hard metal. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, V.43, Issue 13, (1375–1382).
- Kim, B., Schmittiel, M., C., Degertekin, F., L., Kurfess, T., R., 2004. Scanning grating micro interferometer for MEMS metrology. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126, 807–812
- Kim, D., H., Lee, P., Lee, S., W., 2014. Experimental Study on Machinability of Ti-6Al-4V in Micro End-Milling. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2014 Vol II*, ISBN: 978-988-19253-5-0.
- Kuram, E., 2017. Kesici Takım Bağlama Uzunluğunun Mikro Frezelemede Takım Aşınması, Kuvvetler ve Çapak Boyutu Üzerindeki Etkileri. *Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt 19, Sayı 55, Türkiye
- Lee, K., Dornfeld, D.A., 2005. Micro-Burr Formation and Minimization Through Process Control. *Precision Engineering*, 29, 246–252.
- Lee, W.B., Cheung, C.F., 2001. A Dynamic Surface Topography Model for The Precision of Nano-Surface Generation in Ultra-Precision Machining. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43, 961–991.
- Li, H., Lai, X., Li, C., Feng, J., Ni, J., 2008. Modeling and Experimental Analysis of the Effects of Tool Wear, Minimum Chip Thickness and Micro Tool Geometry on the Surface Roughness in Micro-End-Milling. *Journal of Micromechanical and Microengineering*, 18(2), 1–12.
- Li, W., Zhou, Z.X., Xiao, H., Zhang, B., 2015. Design and evaluation of a high-speed and precision micro spindle. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* Vol.78 (5), pp 997–1004, London
- Liu, K., Li, X., P., Rahman, M., 2003. Characteristics of high-speed micro-cutting of tungsten carbide. *Journal of Materials Processing Technology* 140, 352–357.
- Liu, X., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., and Ehmann, K. F., 2004. The mechanics of machining at the microscale: assessment of the current state of the science. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 126 (4) 666–678.
- Liu, X., Jun, M., B., Devor, R., E., Kappor, S., G., 2004. Cutting Mechanisms and their Influence on Dynamic Forces, Vibrations and Stability in Micro-end Milling. *Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Anaheim California, 13–20.
- Lucca, D., A., Rhorer, R., L., Komanduri, R., 1991. Energy dissipation in the ultra-precision machining of copper. *Annals of CIRP*, 40, 559–562.
- Luo, X., Cheng, K., Webb, D., 2005. Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, Issues 2-3, pp 515-528, UK.
- Makki, H., Heinemann, R., Hinduja, S., Owodunni, O., 2009. Online Determination of Tool Run-Out and Wear Using Machine Vision and Image Processing Techniques. 5th Virtual Conference Innovative Production Machines and Systems, 6-17 July, (CD-ROM).
- Mamedov A. ve Lazoğlu İ., 2012. Mikro Frezeleme için Mekanistik kuvvet Modeli. 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 175-183, Türkiye.
- Masuzawa, T., 2000. State of the Art of Micromachining. *Annals of CIRP*, 49(2): 473–488.
- Masuzawa, T., and Tönshoff, H. K., 1997. Three-dimensional micromachining by machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 46 (2) 621–628. Germany.
- Moriwaki, T., Sugimura, N., Luan, S., 1993. Combined stress material flow and heat analysis of orthogonal micromachining of copper. *Annals of CIRP* 42, 75–78.
- Oliaei, S., N., B., Karpat Y., 2015. Influence of tool wear on machining forces and tool deflections during micro-milling. Springer-Verlag, London. DOI 10.1007/s00170-015-7744-4
- Onikura, H., Ohnishi, O., Take, Y., 2000. Fabrication of micro carbide tools by ultrasonic vibration grinding. *Annals of CIRP* 49.
- Özel, T., Olleak, A., Thepsonthi, T., 2017. Micro milling of titanium alloy Ti-6Al-4V: 3-D finite element modeling for prediction of chip flow and burr formation. *Prod. Eng. Res. Devel*, 11: 435–444.
- Perçin, M., Aslantaş, K., Uçun, İ., Çiçek, A., 2015. Mikro Frezeleme İşleminde Kesme Koşullarının Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisi. 8. Müh. ve Teknoloji Sempozyumu, 14-15 Mayıs/Çankaya Üniversitesi/Ankara, s 45-50

- Saedon, J., Norrdin N., A., Yahaya, M., A., Kasim, M., S., and Mohamad Nor, NH., 2016. Investigation of Cutting Edge Radius Effect in Macro-machining and Micro-machining. Regional Conference on Science, Technology and Social Sciences (RCSTSS 2014), DOI 10.1007/978-981-10-0534-3\_2, 17-26p.
- Schaller, T., Bohn, L., Mayer, J., Schubert, K., 1999. Microstructure grooves with a width of less than 50 mm cut with ground hard metal micro end mills. Precision Engineering 23 229–235.
- Schmitz, T., Couey, J., Marsh, E., Mauntler, N., Hughes, D., 2007. Runout Effects in Milling: Surface finish, Surface Location Error, and Stability. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, 841–851
- Schmitz, T., L., Davies, M., Kennedy, M., D., 2002. Tool point frequency response prediction for high-speed machining by RCSA. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123, 700–707.
- Shaw, M.C., 1995. Precision finishing. Annals of CIRP 44 (1) 343–348.
- Shreyes, K.L., Melkote, N., 2006. Effect of Plastic Side flow on Surface Roughness in the Micro-Turning Process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46, 1778–1785.
- Son, S., M., Lim, H., S., Ahn, J., H., 2005. Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro-cutting. International Journal of Machine Tools and Manufacture 45, 529–535.
- Thepsonthi, T., Özel, T., 2012. Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti6Al4V titanium alloy. Int J. Adv Manuf Technol, 63:903–914
- Thepsonthi, T., Özel, T., 2013. Experimental and finite element simulation-based investigations on micro-milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Effect of CBN coating on tool wear. Journal of Materials Processing Technology, 213, 532-542
- Ucun, I., Aslantas, K., Bedir, F. 2013. An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro-milling of Inconel 718 superalloy. Wear, 300, 8–19
- Ucun, İ., Aslantaş, K., Bedir, F. 2010. İncel 718 Süper Alaşımının İşlenmesinde Kaplanmış Mikro Takımların Aşınma Davranışları ve Performans Analizi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt: 7, No: 4, 47-55.
- Venkatesh, V. C., Izman, S., 2007. Precision Engineering. pp 436, Tata McGraw-Hill, USA.
- Venkatesh, V., Swain, N., Srinivas, G., Kumar, P. and Barshilia, H.C., 2016. Review on the machining characteristics and research prospects of conventional micro-scale machining operations. Materials and Manufacturing Process, 32(3), 235-262.
- Vogler, M., P., Devor, R., E., Kapoor S., G., 2004. On the modeling and analysis of machining performance in micro end milling. Journal of Manufacturing Science and Engineering 126 (4) ,685–705.
- Vogler, M.P., Liu, X., Kapoor, S., G., Devor, R., E., Ehmann, K., F., 2002. Development of mesoscale machine tool (mMT) systems. Society of Manufacturing Engineers MS n MS02-181 1–9.
- Wan, Y., Change, K., Sun, S., 2013, An innovative method for surface defects prevention in micro milling and its implementation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Proc IMechE Part J: Engineering Tribology 227(12) 1347–1355.
- Wang, Z., Kovvuria, V., Araujo, A., Baccic M., Hunga, W.N.P., Bukkapatnama, S.T.S., 2016. Built-up-edge effects on surface deterioration in micro-milling Processes. Journal of Manufacturing Processes 24, 321–327. Brazil.
- Weule, H., Huntrup, V., Triteschle, H., 2001. Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization. Annals of the CIRP, 50(1), 61-64.
- Wu X, Li L, Zhao M, He N, 2015. Experimental investigation of specific cutting energy and surface quality based on negative effective rake angle in micro turning. Int J Adv Manuf Technol 82:1941–194
- Wu, X., Li, L., He, N., 2017. Investigation on the burr formation mechanism in micro-cutting. Precision Engineering, 47, pp191–196.
- Wu, T., 2012. Tooling Performance in Micro Milling: Modelling, Simulation, and Experimental Study. School of Engineering and Design, Brunel University, Doctorate Thesis, 229pp, England.
- Y. Okazaki, N. Mishima, K. Ashida, 2004. Micro factory-concept, history, and developments. Journal of Manufacturing Science and Engineering 126, 837–844.
- Y.B. Bang, K. Lee, S. Oh, 2005. 5-Axis micro milling machine for machining micro parts. Int J Advanced Manufacturing Technology, 25: 888–894
- Yuan, Z.J., Zhou, M., Dong, S., 1996. Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultra-Precision Machining. Journal of Materials Processing Technology, 62(4), 327–330.
- Zareena, A., R., Veldhuis, S., C., 2012. Tool wear mechanisms and tool life enhancement in ultra-precision machining of titanium. Journal of Materials Processing Technology, 212, 560-570
- Zhan, z., Liang Li, Ning H. & Rabin Sh., 2014. An experimental study on grinding parameters for manufacturing PCD micro-milling tool. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, V. 73, Issue 9, pp 1799–1806. London.
- Zhang, X., Ehmann, K., F., T., Wang, W., 2016. Cutting forces in micro-end-milling processes. International Journal of Machine Tools & Manufacture 107, 21–40, China
- Zhou, Li, W., Xiao, Z.X., Zhang, H., B., 2015. Design and evaluation of a high-speed and precision micro spindle. Int. J. Adv. Manuf. Technol. Vol.78 (5), pp 997–1004, London.