



**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ**  
**DERGİSİ**

CUKUROVA UNIVERSITY  
JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING

Cilt/Vol: 36

Sayı/Issue: 4

Aralık/December 2021

ISSN 2757-9255



**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ**  
Cukurova University, Journal of the Faculty of  
Engineering



**Sahibi (Owner)**

Ulus ÇEVİK  
Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dekanı

**Editör (Editor)**

Serin MEZARCIÖZ

**EDİTÖR KURULU (Editorial Board)**

**Ramazan ÇOBAN** (Çukurova Üniversitesi)

**Mutlu AVCI** (Çukurova Üniversitesi)

**Mustafa GÖK** (Çukurova Üniversitesi)

**Ahmet DAĞ** (Çukurova Üniversitesi)

**Hüseyin AKILLI** (Çukurova Üniversitesi)

**Ulus ÇEVİK** (Çukurova Üniversitesi)

**Ali KOKANGÜL** (Çukurova Üniversitesi)

**Mesut BAŞIBÜYÜK** (Çukurova Üniversitesi)

**Mevlüt Sami AKÖZ** (Çukurova Üniversitesi)

**Oğuz DEMİRYÜREK** (Erciyes Üniversitesi)

**Hüsamettin BULUT** (Harran Üniversitesi)

**Metin GÜRÜ** (Gazi Üniversitesi)

**Mehmet Emin AYDIN** (University of the  
West of England, İngiltere)

**Azra BİLGİN** (University of Colorado Boulder,  
ABD)

**Ulvi Can ÜNLÜGENÇ** (Çukurova Üniversitesi)

**Özen KILIÇ** (Çukurova Üniversitesi)

**Serin MEZARCIÖZ** (Çukurova Üniversitesi)

**Zeynep ZAIMOĞLU** (Çukurova Üniversitesi)

**Ali KESKİN** (Çukurova Üniversitesi)

**R. Tuğrul OĞULATA** (Çukurova Üniversitesi)

**F. Duygu SABAN** (Çukurova Üniversitesi)

**Hüseyin VAPUR** (Çukurova Üniversitesi)

**Hüseyin R. YERLİ** (Çukurova Üniversitesi)

**Ergun ERÇELEBİ** (Gaziantep Üniversitesi)

**Nihan ÇETİN DEMİREL** (Yıldız Teknik Üniversitesi)

**Serter ATABAY** (American University of Sharjah,  
United Arab Emirates)

**Muammer KOÇ** (Hamad Bin Khalifa University,  
Qatar)

**Tamio ENDO** (Mie University-Japonya)

**Hakemli Bir Dergidir. Yılda Dört Sayı Basılır. / Refereed Journal. Published Quarterly.**

Dergimiz **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi'nde taranmaktadır.  
Indexed by **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi

**Derginin eski adı: Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**  
**(ISSN: 1019-1011)**

**YAZIŞMA ADRESİ/CONTACT**

Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergi ve Yayın Kurulu Başkanlığı Balcalı 01330 Sarıçam/ADANA  
Tel : (322) 338 63 57 Fax : (322) 338 61 26 E-posta: mmfdergi@cu.edu.tr - cu.mmfdergi@gmail.com

## **AMAÇ ve KAPSAM**

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, yılda dört sayı olarak yayımlanan hakemli bilimsel bir dergidir. Mühendislik alanındaki gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişmelerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda Türkçe bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır. Derginin yazım dili Türkçe/İngilizcedir. Daha önce başka bir yerde yayımlanmamış tüm özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları kapsayan makaleler kabul edilmektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. **“Araştırma ve uygulama içeren makaleleri”** yayımlanmaktadır.

## **AIM and SCOPE**

Journal of the Engineering Faculty of Cukurova University is a peer-reviewed scientific journal which is currently published quarterly. The journal is published to follow the developments in the field of engineering, to contribute to the national and international development of professional organizations and individuals, and to create a Turkish resource in these areas. The language of the journal is Turkish/English. All original and up to date scientific research and applications articles that have not been published elsewhere are accepted. Theoretical/experimental and practical studies related to all engineering fields are in the scope of the Journal. Translation and compilation articles are not accepted. The journal publishes **“articles of research and practice”**.





## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

<b>Elektrokimyasal Depolama Yöntemi ile AISI 304 Çeliği Yüzeyine Biriktirilen Ni-B/TiB<sub>2</sub> Kompozit Kaplamaların Kristal Yapı ve Bazı Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.....</b>	<b>847</b>
<i>Investigation of Crystal Structure and Mechanical Properties of Electrochemically Deposited Ni-B/TiB<sub>2</sub> Composite Coatings</i>	
<b>Ersin ÜNAL, Abdulkadir YAŞAR ve İsmail Hakkı KARAHAN</b>	
<b>Hayvansal Lif Karışımli Kumaşların Isıl Tuşesi Üzerine Bir Araştırma .....</b>	<b>861</b>
<i>A Research on Thermal Effusivity of Blend Fabrics with Animal Fibers</i>	
<b>Seval UYANIK</b>	
<b>Investigation of Sediment Deposition in Dam Reservoirs .....</b>	<b>869</b>
<i>Baraj Rezervuarlarında Sediment Birikiminin İncelenmesi</i>	
<b>Şerife Pınar GÜVEL</b>	
<b>Pamuk Çiğidi Küspesi ve Kırmızı Biber İşleme Atıklarından Biyoyakıt Amaçlı Pelet Elde Edilmesi.....</b>	<b>879</b>
<i>Pellet Production for Biofuel from Cotton Cake and Red Pepper Processing Wastes</i>	
<b>Ülkü Fidan BAŞIBÜYÜK, Ali AYBEK ve Serdar ÜÇÖK</b>	
<b>Al/NbB<sub>2</sub> In-Situ Kompozit Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi .....</b>	<b>891</b>
<i>Production and Properties of Al/NbB<sub>2</sub> In-situ Composite</i>	
<b>Hüseyin DEMİRTAŞ, Erdem KARAKULAK ve Hari Babu NADENDLA</b>	
<b>The Turbulence Intensity Effect on the Flow Characteristics and Aerodynamics of a Circular Cylinder .....</b>	<b>901</b>
<i>Türbülans Şiddetinin Dairesel Bir Silindir Üzerinde Oluşan Akış Yapısına ve Aerodinamiğine Etkisi</i>	
<b>İlyas KARASU ve Sergen TÜRMESE</b>	
<b>Machine Learning Approach for Predicting Employee Attrition and Factors Leading to Attrition .....</b>	<b>913</b>
<i>Çalışan Yıpranmasının ve Yıpranmaya Neden Olan Faktörlerin Tahmininde Makine Öğrenimi Yaklaşımı</i>	
<b>İrem ERSÖZ KAYA ve Oya KORKMAZ</b>	

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- A Vector-Based Mapping in GIS Environment to Classify Local Climate Zone ..... 929**  
*Yerel İklim Zonlarının CBS Ortamında Vektör-Tabanlı Haritalanması*  
**Müge ÜNAL ÇİLEK**
- Effect of Various Matrix Materials on Mechanical Properties of Basalt/Jute/Glass  
Fiber Reinforced Hybrid Composites ..... 941**  
*Çeşitli Matris Malzemelerinin Bazalt/Jüt/Cam Elyaf Takviyeli Hibrit Kompozitlerin  
Mekanik Özelliklerine Etkisi*  
**Berkay KARAÇOR ve Mustafa ÖZCANLI**
- Prefabrik Düşey Drenlerin Farklı Eşleme Yöntemleri ile Sayısal Analizi ..... 955**  
*Numerical Analysis of Prefabricated Vertical Drain with Different Matching Methods*  
**Ufuk TUNÇ, Hüseyin ÇOLAKOĞLU, Erdem ÜSTÜNAY, Abdulazim YILDIZ ve  
Baki BAĞRIAÇIK**
- Aerodynamic Analysis of Onshore Commercial Large Scale Wind Turbine ..... 965**  
*Kara Tipi Ticari Büyük Ölçekli Rüzgâr Türbininin Aerodinamik Analizi*  
**Akın İLHAN, Mehmet BİLGİLİ, Melih SARI ve Beşir ŞAHİN**
- ZrO<sub>2</sub> Nanolif Oksijen Sensörünün Performans Değerlendirmesi ..... 979**  
*Performance Assessment of ZrO<sub>2</sub> Nanofibrous Oxygen Sensor*  
**Özlem ERDEM YILMAZ**
- Optimization of Urban Cargo Distribution Network and Station Points with Open  
Source GIS ..... 989**  
*Açık Kaynak CBS ile Şehirçi Kargo İstasyon Noktalarının Optimizasyonu ve Dağıtım  
Planlaması*  
**Şevket BEDİROĞLU**
- An Investigation on Decomposition of Signals and Noise Removal with a Half Band  
Nyquist Filter ..... 997**  
*Yarım Bant Nyquist Filtre ile Sinyallerin Ayırıştırılması ve Gürültünün Giderilmesi  
Üzerine Bir Araştırma*  
**İclal ÇETİN TAŞ ve Sami ARICA**
- Harbiye (Hatay) Şelaleler Bölgesindeki Şev Duraysızlıklarının Mühendislik  
Jeolojisi Açısından Değerlendirilmesi ..... 1005**  
*Assessment of Slope Instability on Waterfalls Region in terms of Engineering Geology  
(Harbiye, Hatay)*  
**Mehmet DUYAN ve Sedat TÜRKMEN**

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Kritik Enerji Tesislerinin Deprem Risk Değerlendirmesinde Farklı Hasargörebilirlik Fonksiyonlarının İncelenmesi..... 1019**  
*Investigation of Different Vulnerability Functions in Earthquake Risk Assessment of Critical Energy Facilities*  
**A. Can ZÜLFİKAR, Seyhan OKUYAN AKCAN, Ali YEŞİLYURT, Murat ERÖZ ve Tolga CİMİLLİ**
- A Bandpass Frequency Selective Surface Filter for Earth Observation Satellite and Radar Applications ..... 1033**  
*Yer Gözlem Uydusu ve Radar Uygulamaları için Bant Geçiren Frekans Seçici Yüzey Filtresi*  
**Olcay ALTINTAŞ**
- Performance Benchmarking of Active-Front-End Rectifier Topologies Used in High-Power, High-Voltage Onboard EV Chargers ..... 1041**  
*Yüksek Güçlü, Yüksek Gerilimli Yerleşik EV Şarj Cihazlarında Kullanılan Active-Front-End Doğrultucu Topolojilerinin Performans Kıyaslaması*  
**Mehmet Uğraş CUMA ve Murat Mustafa SAVRUN**
- Calculation of Pile Capacity in Cohesionless Soil by CPT Considering Spatial Variability ..... 1051**  
*Kohezyonsuz Zeminde CPT ile Kazık Kapasitesinin Boşluksal Değişkenlikle Hesabı*  
**Ahmet Can MERT ve Gökhan YAZICI**
- Improving the Breaking and Tear Strength of Cotton Fabric Using BTCA and CA Crosslinkers ..... 1061**  
*BTCA ve CA Çapraz Bağlayıcılar Kullanılarak Pamuklu Kumaşın Kopma ve Yırtılma Mukavemetinin Geliştirilmesi*  
**Aslıhan KORUYUCU**
- Sorel Çimentolu Hafif Betonların Mekanik ve Yalıtım Özelliklerinin İncelenmesi ..... 1073**  
*Investigation of Mechanical and Insulation Properties of Sorel Cement Lightweight Samples*  
**Hüseyin TEMİZ ve Ergin TANDIRCI**

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Vardiyalı Çalışanların Gürültü Algı Yanılgısının İncelenmesi..... 1089**  
*Investigation of Noise Perception Misconception of Shift Workers*  
**Mehmet Zeki ACAR ve Mehmet KARAKILÇIK**
- Improving Digital Image Quality for Convolution Neural Network Based  
Computer-Aided Diagnosis (CNN-CAD) of Skin Cancer..... 1099**  
*Cilt Kanseri Teşhisi için Konvolüsyonel Sinir Ağları Tabanlı Bilgisayar Destekli Tanıda  
(CNN-CAD) Dijital Görüntü Kalitesinin İyileştirilmesi*  
**Tolga YALÇIN ve Amira TANDİROVİC GÜRSEL**
- Türkiye’de Değişen Yapı Özelliklerinin Karşılaştırmalı İncelemesi..... 1111**  
*A Comparative Investigation of Changing Building Characteristics in Turkey*  
**Bekir ÖZER AY ve Tuba EROĞLU AZAK**
- Denim Kumaşlara Çevre Dostu Ön Terbiyesiz Boyama Metodunun Uygulanması ..... 1127**  
*Application of Eco-friendly and Non-pretreatment Dyeing Method to Denim Fabrics*  
**Serin MEZARCIÖZ ve Serdal SIRLIBAŞ**

## Elektrokimyasal Depolama Yöntemi ile AISI 304 Çeliği Yüzeyine Biriktirilen Ni-B/TiB<sub>2</sub> Kompozit Kaplamaların Kristal Yapı ve Bazı Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Ersin ÜNAL<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-3183-9592

Abdulkadir YAŞAR<sup>\*2</sup> ORCID 0000-0002-1548-2386

İsmail Hakkı KARAHAN<sup>3</sup> ORCID 0000-0002-8297-3521

<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Osmaniye

<sup>2</sup>Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>3</sup>Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Hatay

Geliş tarihi: 17.05.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: ÜNAL, E., YAŞAR, A., KARAHAN, İ.H., (2021). Elektrokimyasal Depolama Yöntemi ile AISI 304 Çeliği Yüzeyine Biriktirilen Ni-B/TiB<sub>2</sub> Kompozit Kaplamaların Kristal Yapı ve Bazı Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 847-860.

### Öz

Bu çalışmada, Watts tipi nikel banyosunda Ni-B alaşım anayapılı ve TiB<sub>2</sub> mikro parçacık takviyeli kompozit kaplama, paslanmaz çelik altlık üzerine depolanmıştır. Elde edilen kompozit kaplamanın özellikleri saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamalar ile mukayese edilerek incelenmiştir. Takviye parçacıkların etkisini belirlemek amacıyla kristal yapı, mikrosertlik, morfoloji ve aşınma dayanımı analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre takviye parçacıkların, saf nikel ve Ni-B alaşımına göre kristal yapı üzerinde değişime neden olduğu görülmüştür. Ayrıca mikro TiB<sub>2</sub> parçacıklar sertlikte de artışa sebep olmuştur. Parçacıklar mikro sertlikte, paslanmaz çeliğe göre %225, saf nikelde göre %115 civarında artışa sebep olurken, Ni-B alaşımına kıyasla yaklaşık %60 civarında bir artışla sonuçlanmıştır. Kompozit kaplamanın morfolojisinin de diğer kaplamalardan oldukça farklı olduğu, fakat genel olarak düzgün bir yüzeye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, kompozit kaplamanın aşınma dayanımının saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamalarına kıyasla daha iyi olduğu analiz sonuçlarından anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrodopolama, Kompozit kaplama, Mikrosertlik, Aşınma, Ni-B alaşım

### Investigation of Crystal Structure and Mechanical Properties of Electrochemically Deposited Ni-B/TiB<sub>2</sub> Composite Coatings

#### Abstract

In this study, Ni-B alloy mainstructure and TiB<sub>2</sub> micro particle supported composite coating was deposited in a Watts type nickel bath on a stainless steel substrate. The properties of the composite

\*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Abdulkadir YAŞAR, [ayasar@cu.edu.tr](mailto:ayasar@cu.edu.tr)

coating obtained were compared with pure nickel and Ni-B alloy coatings. Crystal structure, microhardness, morphology and wear resistance analysis were executed in order to determine the effect of reinforcement particles. According to the results, it was seen that reinforcement particles cause changes on the crystal structure compared to pure nickel and Ni-B alloy. In addition, micro TiB<sub>2</sub> particles caused an increase in hardness. The particles resulted in an increase in micro hardness of about 225% compared to stainless steel and about 115% compared to pure nickel, while it resulted in an increase of about 60% compared to the Ni-B alloy. It has been observed that the morphology of the composite coating was also quite different from other coatings, but has a generally smooth surface. In addition, it was understood from the analysis results that the wear resistance of the composite coating was better compared to the pure nickel and Ni-B alloy coatings.

**Keywords:** Electrodeposition, Composite coating, Microhardness, Wear, Ni-B alloy

## 1. GİRİŞ

Yüksek mekanik dayanıklılık, iyi korozyon direnci ve maliyet etkinliği gibi olumlu özellikleri nedeniyle, mühendislik tasarımı nikel ve nikel alaşımlı kaplamalar yaklaşık yüzyıldır endüstride kullanılmaktadır [1-3]. Nikel esaslı kaplamalar, her sanayi sektörünün özel ihtiyaç ve talepleri doğrultusunda geliştirilmeye devam etmektedir. Örneğin, Ni-B kaplamalar otomotiv, havacılık ve kimya mühendisliği sektörlerinin yüksek korozyon, mekanik ve tribolojik direnç talepleri için kullanılabilir [3-6]. Elektrolitik ve elektriksiz depolama teknikleri uygulama kolaylığı ve çeşitliliği nedeniyle endüstride en çok tercih edilen tekniklerdir. Yüksek sıcaklıklara ve pH değerlerine ihtiyaç duyulması ve bu parametrelerin elektriksiz biriktirme için titiz bir şekilde uygulanması zorunluluğu nedeniyle, elektro-depolama metodu Ni-B kaplamaların biriktirilmesi için daha uygun görünmektedir [6-8].

Elektro-depolama metodunun tercih sebepleri arasında; hızlı yapılabilmesi, düşük maliyetli olması, kolay üretilmesi, saflığının yüksek olması, üretim parametrelerinin geniş bir aralıkta kontrol edilebilmesi, tekrar üretilebilirliği ve ısı işleme ihtiyacı duyulmaması gibi özellikleri bulunmaktadır [9,10]. Alaşım kaplamalardan mekanik özellikler açısından belli bir seviyeye kadar olumlu sonuçlar alınabilmektedir, fakat seramik partiküllerle güçlendirilmiş kompozit kaplamalar, daha iyi özellikler elde etmek için umut verici bir ilerleme olarak görülmektedir [11].

Metal veya alaşım ana yapıya iyi dağılmış partiküller sadece mekanik özellikleri (sertlik, aşınma direnci) ve kimyasal kararlılığı (korozyon direnci, termal kararlılık) geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda potansiyel uygulamalarını da genişletmektedir [12]. Son yıllarda Ni-B alaşımlı kompozit kaplamalarla ilgili birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalara Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [11], hBN [3,13], SiC [14], V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ve ZrO<sub>2</sub> [15], Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [16], AlN [17], elmas [18], TiC [19], YSZ [20], Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [21] örnek olarak verilebilir.

Titanyum diborür (TiB<sub>2</sub>) yüksek erime noktası (2980 °C), yüksek sertlik (3350 Hv), düşük elektrik direnci (9 Ω cm), yüksek korozyon direnci, yüksek ıslanabilirlik, daha iyi ısı şok direncine sahiptir. Ayrıca, yüksek mekanik ve aşınma direnci TiB<sub>2</sub>'ün üstün özelliklerindedir. Bu nedenle, türbin kanatları, yanma odaları, kimyasal reaktör kapları, kesici takımlar ve pompa çarkları gibi birçok uygulamalarda uygun bir kaplama malzemesidir [22-24]. Bu üstün özelliklere sahip TiB<sub>2</sub> parçacıklarının kendisini birçok sektörde ispat etmiş Ni-B alaşım ana yapı ile birlikte imal edilmesiyle ortaya çıkacak kompozit kaplamanın özelliklerinin belirlenmesi hem bu alana yenilikler getirecek ve hem de önemli katkılar sunacaktır. Bu çalışmada, Ni-B alaşım ana yapı malzemesi, mikro boyuttaki titanyum diborür parçacıkları ile desteklenerek kompozit kaplama elde edilmiştir. Ana yapıya ilave edilen bu sert seramik partiküllerin mekanik ve kristal yapı özelliklerini nasıl etkilediği ile ilgili çeşitli analizler yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

Kaplamalar AISI 304 paslanmaz çelik altlık üzerine elektrokimyasal depolama metodu ile geleneksel Watts tipi nikel banyosunda imal edilmiştir. Elektrokimyasal çalışmaların tümü CH instruments 608E model elektrokimyasal analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Katot olarak 4 cm<sup>2</sup> alana sahip paslanmaz çelik kullanılırken, anot olarak platin malzemeli tel bir çubuk kullanılmıştır. Geleneksel 3 elektrotlu sistemde referans elektrot olarak doygun kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır. Katot, anot ve referans elektrotlar kaplama banyosu içine dikey olarak yerleştirilmişlerdir ve aralarında yaklaşık olarak 3'er cm boşluk bırakılmıştır.

Kaplama işlemine başlanmadan önce paslanmaz çelik altlıklar bir dizi hazırlık işleminden geçirilmiştir. Önce 4 cm<sup>2</sup> alana sahip kaplama yapılacak paslanmaz çelik yüzeyi kalından inceye doğru zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. Daha sonra %10 oranında hidroklorik asit (HCl) ile karıştırılmış saf su içinde 1-2 dakika süresince dağlama işlemine tabi tutulmuş ve müteakiben saf su ile durularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır.

Kaplama banyosunda nikel kaynağı olarak nikel sülfat hekza hidrat (NiSO<sub>4</sub>.6H<sub>2</sub>O) ve nikel klorür hekza hidrat (NiCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O), bor kaynağı olarak trimetilamin boran kompleksi (TMAB) kullanılmıştır. Kompozit kaplama elde etmek için banyo içine 2-5 µm boyutunda titanyum diborür (TiB<sub>2</sub>) toz parçacıkları ilave edilmiştir. Ayrıca elektrokimyasal banyoya yüzey aktifleştirici olarak sodyum dodesil sülfat (SDS) ve tane küçültücü ajan olarak ise sakarin ilave edilmiştir. Bunlara ilaveten pH düzenleyici ve kompleks yapıcı ajan olarak borik asit (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) elektrolite belli oranda

eklenmiştir. Tüm depolama işlemlerinde 50 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu ve pH 4 değeri kullanılmıştır. Banyo sıcaklığı ise 43±1 °C civarlarında sabit tutulmaya çalışılmıştır. Depolama süresi ise 60 dk olarak sabitlenmiştir.

Kompozit kaplama banyosunda olası parçacık topaklanmalarını önlemek amacıyla, depolama öncesi 30 dk ultrasonik karıştırma yapılmıştır. Bu işlem Hielscher UP 200S marka ve model ultrasonik karıştırma cihazı ile gerçekleştirilmiş ve çevrim değeri 1, genlik değeri ise %70 olarak ayarlanmıştır (~22 kHz). Ayrıca, kompozit kaplama depolanırken banyo manyetik karıştırıcı ile 200-300 dev/dk değerinde karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Çizelge 1'de elektrolit bileşenleri ve depolama parametreleri özet olarak sunulmuştur. Ayrıca, Çizelge 1'de kullanılan bütün kimyasal maddelerin yanlarında saflık dereceleri de belirtilmiştir. Depolama sonrasında numuneler saf su ile durulanmış ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Mikro boyuttaki TiB<sub>2</sub> parçacıkların toz boyutu ölçümleri Malvern Mastersizer 3000 tip cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Olympus BX51 marka ve model cihaz ile de optik mikroskop görüntüleri elde edilmiştir. Mikro sertlik ölçümlerinde ise Future-TECH FM-700e marka ve model cihaz kullanılmıştır. Aşınma deneyleri için Turkyus marka POD&HT&WT model (Türkiye) aşınma analizi cihazı kullanılmıştır.

Üretilen saf nikel, Ni-B ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> kaplamaların kristal yapılarının karakterize edilebilmesi için numunelerin XRD desenleri elde edilmiştir. X ışını kırınım desenleri elde edilirken 2θ=0-100° aralığında, 40 kV ve 30 mA değerlerinde CuK<sub>α</sub> radyasyonu üreten PANalytical marka, Empyrean model XRD cihazı kullanılmıştır (λ=1.5418 Å).

**Çizelge 1.** Banyo bileşenleri ve depolama parametreleri

Banyo bileşenleri	Görevi	Miktarı
NiSO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O (Nikel sülfat hekza hidrat) %99,99	Nikel kaynağı	240 g/l
NiCl <sub>2</sub> . 6H <sub>2</sub> O (Nikel klorür hekza hidrat) %98	Nikel kaynağı	45 g/l
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (Borik asit) %99,5	Kompleks yapıcı	30 g/l
Trimetilamin boran kompleksi (TMAB) %97	Bor kaynağı	3 g/l
Titanyum diborür tozu (TiB <sub>2</sub> ) %99 mikro boyutta	Takviye parçacık	5 g/l

Çizelge 1 (Devam)

Sodyum dodesil sülfat (SDS) %99	Yüzey aktifleştirici	0,5 g/l
Sakarın %98	Tane küçültücü	2 g/l
<b>Depolama parametreleri</b>		<b>Değeri</b>
Akım yoğunluğu		50 mA/cm <sup>2</sup>
pH		4
Sıcaklık		43±1 °C
Süre		60 dk
Banyo karıştırma hızı		200-300 rpm
Depolama öncesi ultrasonik karıştırma		30 dk

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

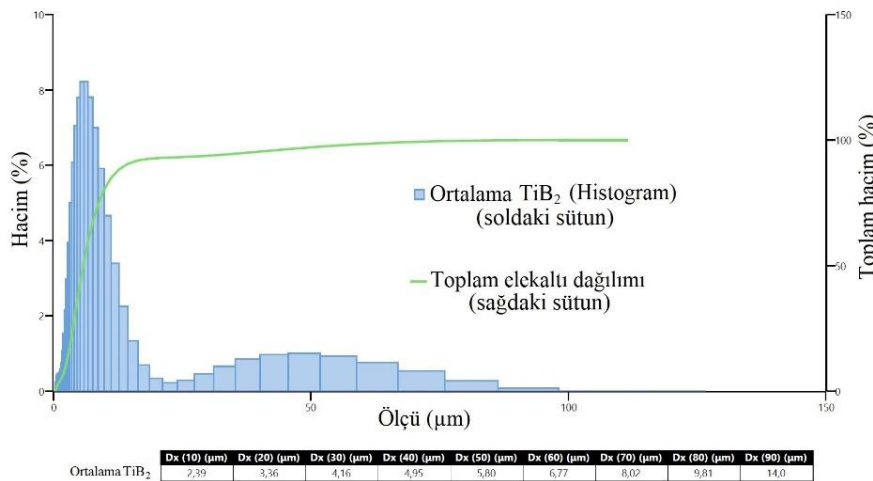
#### 3.1. Mikro Boyutlu TiB<sub>2</sub> Takviye Parçacıkların Karakterizasyonu

Mikro boyuttaki TiB<sub>2</sub> parçacıkları için, tozların tedarik edildiği firmanın verdiği toz boyutu 2-5 µm aralığındadır. Mikro boyutlu takviye parçacıkların toz boyutu ölçümü sonucu elde edilen grafikler Şekil 1'de sunulmuştur. Şekil 1'deki veriler incelendiğinde toz boyutlarının yaklaşık 2,4 µm ile 14 µm aralığında değişen boyutlarda olduğu görülmektedir ve parçacıkların yaklaşık %50'sinin toz boyutunun 5 µm'dan daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir.

Mikron boyutlu tozlarda topaklanma ve birbirine yapışma gibi nedenlerden dolayı 14 µm'a varan ölçüde toz boyutları elde edildiği ifade edilebilir.

Bunun yanında şekilde verilen grafik analiz edildiğinde 10 µm'dan büyük tozların miktarının, toplam toz miktarına göre çok daha az olduğu anlaşılmaktadır.

Mikro tozlar için firmanın verdiği toz boyutu 2-5 µm aralığındadır. Şekil 1'de mikro boyutlu parçacıkların toz boyutu ölçümü sonucu elde edilen grafikler verilmiştir. Şekil 1'deki ölçüm sonuçları incelendiğinde toz boyutlarının yaklaşık 2,4 µm ile 14 µm arasında değiştiği görülmektedir ve parçacıkların yaklaşık yarısının toz boyutunun 5 µm'dan daha küçük olduğu görülmektedir. Mikron boyutlu tozlarda topaklanma sonucu 14 µm'a varan ölçüde toz boyutları elde edildiği söylenebilir. Fakat şekildeki grafik incelendiğinde 10 µm'dan büyük tozların miktarının çok az olduğu görülmektedir.

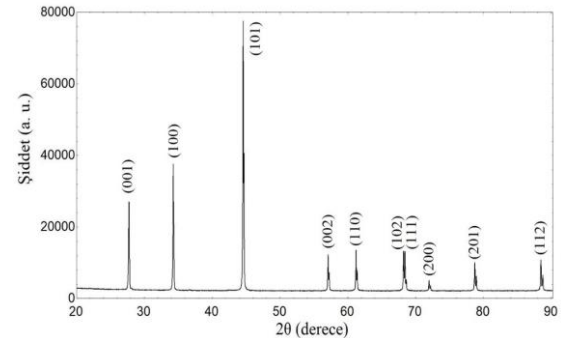


Şekil 1. Mikro boyutlu TiB<sub>2</sub> parçacıklarının toz boyutu ölçüm sonuçları



Mikro boyuttaki TiB<sub>2</sub> takviye parçacıklarına ait XRD kırınım deseni Şekil 2’de verilmiştir. 44,2 derece civarında görülen (101), en şiddetli ana pik olmak üzere, bu pike (001), (100), (002), (110), (102), (111), (200), (201) ve (112) pikleri eşlik etmektedir. Takviye parçacık olarak kullandığımız bu TiB<sub>2</sub> mikro tozlara ait XRD kırınım deseninin, literatürde TiB<sub>2</sub> kullanılan çalışmalarda elde edilen XRD desenleri ile uyumlu olduğu görülmektedir [24-29]. Ayrıca, Çizelge 2’de TiB<sub>2</sub> tozlarına ait XRD deseninden elde edilen parametreler verilmiştir. TiB<sub>2</sub> tozların tane büyüklüğü 70,8 nm olarak hesaplanmıştır. Şekil 2’de mikro boyutlu TiB<sub>2</sub> takviye parçacıklarına ait XRD kırınım sunulmuştur. En şiddetli pik, yani ana pik 44,2 derece civarında görülen (101) olarak göze çarpmaktadır, bu pike (001), (100), (002), (110), (102), (111), (200), (201) ve (112) pikleri eşlik etmektedir. Çalışmamızda ana yapıyı destek amaçlı parçacık olarak kullandığımız bu TiB<sub>2</sub> mikro tozlara ait XRD kırınım deseni grafiğinin,

literatürde diğer çalışmalarda kullanılan TiB<sub>2</sub> parçacıklarına ait XRD desenleri ile uyumlu olduğu görülmektedir [28,30-34]. TiB<sub>2</sub> parçacıkların ortalama tane büyüklüğü Debye Scherrer denklemi [35] ile hesaplanmış ve 70,8 nm olarak elde edilmiştir.



Şekil 2. Mikro boyuttaki TiB<sub>2</sub> takviye parçacıklarının XRD kırınım deseni

Çizelge 2. TiB<sub>2</sub> takviye parçacıklarının XRD deseninden elde edilen parametreler

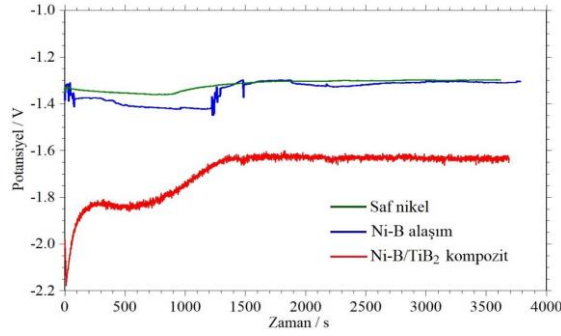
Numune	2θ (derece)	FWHM-β (radyan)	Ortalama kristal tane büyüklüğü-D (nm)	Mikrogerilim-ε	Dislokasyon yoğunluğu-δ (nm <sup>-2</sup> )
TiB <sub>2</sub> tozu	44,5	0,00221	70,8	1,35 x 10 <sup>-3</sup>	0,2 x 10 <sup>-3</sup>

### 3.2. Depolama Banyolarının Kronopotansiyometri Analizleri

Kronopotansiyometri grafikleri potansiyel değişiminin zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedildiği eğrilerdir. Elde ettiğimiz kaplamalarda sabit akım uygulandığından dolayı, depolama esnasında potansiyel sürekli değişmektedir. Depolama yapmamıza imkân veren elektrokimyasal cihaz, sabit akımı hassas bir şekilde sağlayabilmek için anlık olarak potansiyel değerini düzenlemektedir. Kaplamanın yapıldığı elektrolitin cinsine ve ihtiva ettiği bileşenlere göre bu grafikler farklı seyirler izleyebilmektedirler. Depolama zamanı 3600 saniyedir. Şekil 3’te Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplama ve karşılaştırma amacıyla saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamalara ait kronopotansiyometri grafikleri bir arada sunulmuştur. Saf nikel depolanma potansiyeli -1.3 V civarlarında gerçekleşmiştir. Banyoya TMAB ilave edilmesiyle birlikte depolama

potansiyelinde bir miktar artış olduğu gözlenmektedir. Fakat depolama sonlarına doğru Ni-B alaşım ve saf nikelin depolama potansiyellerinin birbirine yakın seyir izledikleri görülmektedir. Elektrokimyasal banyoya mikro boyuttaki TiB<sub>2</sub> parçacıklarının ilave edilmesiyle birlikte depolama potansiyelinde önce ciddi bir artış olduğu, daha sonra bir miktar salınımla azalarak 1500. saniyeden sonra yatay bir seyir izlediği anlaşılmaktadır. Depolama başlangıcında -2.2 V civarlarından, azala azala -1.6 V civarlarına kadar gerilemiştir. Kompozit kaplama banyosunda saf nikel ve Ni-B alaşım kaplama banyolarına kıyasla nispeten daha yüksek bir depolama potansiyeli ile depolanmanın gerçekleştiği görülmektedir. Banyoya ilave edilen parçacıkların elektrolitin direncinde bir miktar yükselmeye sebep olmasında ötürü, potansiyel artışına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, sürüklenme yolu ile taşınan TiB<sub>2</sub> parçacıklarının ortamda bulunmasından kaynaklanan bu potansiyel artışı,

parçacıkların ana yapı ile birlikte kompozit olarak depolandığının da önemli bir verisi olarak görülebilir.



**Şekil 3.** Kaplama banyolarının kronopotansiyometri grafikleri

### 3.3. Kaplamaların Kristal Yapı Analizleri

Numunelerin ortalama kristal tane boyutu (D), mikrogerilim ( $\epsilon$ ) ve dislokasyon yoğunluğu ( $\delta$ ) değerleri hesaplanırken aşağıda verilen formüllerden faydalanılmıştır [30-36] (Eşitlik 1).

$$D = \frac{0,94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

(1) numaralı Debye-Scherrer denkleminde  $\lambda$ : X-ışını dalga boyu,  $\beta$ : ilgili pikin yarı maksimumdaki genişliğinin radyan cinsinden değeri (FWHM),  $\theta$ : ise ilgili pikin Bragg yansıma açısıdır [36] (Eşitlik 1).

$$\epsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (2)$$

(2) numaralı denklem, mikrogerilim hesaplanmasında kullanılmıştır [30] (Eşitlik 2).

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (3)$$

(3) numaralı denklem, dislokasyon yoğunluğu hesaplanmasında kullanılmıştır. Burada D: ortalama kristal tane boyunu ifade etmektedir [30, 33-35].

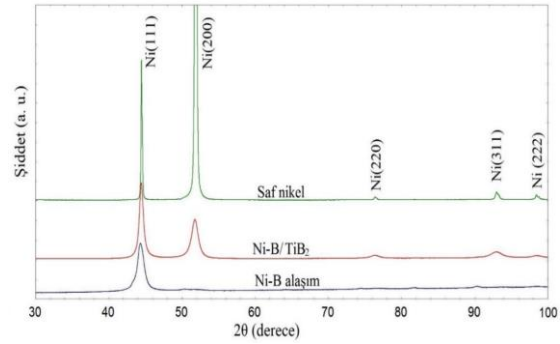
Şekil 4'te Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplamayla birlikte mukayese amacıyla saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamaların XRD desenleri bir arada verilmiştir. Saf nikelin XRD deseni incelendiğinde 52° civarlarında görülen (200) piki ana pik olmak üzere, bunun yanında (111), (220), (311) ve (222) nikelin özgü piklerinin de XRD desenine yansıdığı görülmektedir. (220), (311) ve (222) piklerinin (200) ve (111) piklerine göre çok daha düşük şiddetlerde olduğu ifade edilebilir.

Ni-B alaşımının XRD desenine göz attığımızda, bor atomlarının kafes yapısına dahil olması ile birlikte 44,3° civarlarındaki nikelin özgü (111) piki haricinde diğer tüm piklerin kaybolduğu görülmektedir. Ayrıca, bu pikin şiddetinin de saf nikelin nazaran epeyi bir miktar azaldığı anlaşılmaktadır. Elektrodepolanmış saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamalarla ilgili literatürde de benzer XRD sonuçları elde edildiği görülmektedir [37-41]. Banyoya mikro boyutta TiB<sub>2</sub> parçacıkların ilave edilmesi ile elde edilen kompozit kaplamanın XRD desenini incelediğimizde nikelin özgü piklerin tekrar görünür hale geldiğini söyleyebiliriz. En dikkat çekici fark ise (111) ve (200) piklerinde görülmektedir. Bu piklerin şiddetleri saf nikelin oranla ciddi miktarda azalmıştır ve en şiddetli ana pik kompozit kaplama için (111) pikidir. Kompozit kaplamada (111) pikinin şiddeti saf nikelin göre azalmış görünürken, Ni-B alaşım kaplamaya göre artmış görünmektedir. Ana yapıya bor atomlarının ilavesinin XRD pik yüksekliklerinde azalmaya sebep olduğunu, yani yapıyı kristalli yapıdan amorf yapıya doğru değiştirdiğini ifade edebiliriz. Fakat TiB<sub>2</sub> parçacıklarının ana yapıya dahil olması ile birlikte, bor atomlarının kristal yapı üzerindeki etkisini azaltarak, tekrar XRD piklerinde artışa sebep olduğu ifade edilebilir.

Literatürde Ni-B ana fazı ile birlikte çalışılan diğer takviye seramik parçacıklarda da benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir [11,13,15]. Kompozit kaplamada (200) piki ise saf nikelin göre ciddi miktarda azalmıştır, Ni-B kaplamada ise zaten bu pik hiç görünmemektedir.

Çizelge 3’te saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplamaların XRD desenlerinden elde edilen parametreler verilmiştir. Bu değerler hesaplanırken en yüksek şiddete sahip XRD pikine ait değerler üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. En önemli parametrelerden biri de ortalama kristal tane büyüklüğüdür. Saf nikelin kristal tane boyu 42,6 nm civarlarında hesaplanırken, Ni-B için bu değer çok ciddi derecede azalmış ve 8,7 nm civarlarında hesaplanmıştır. Bor elementinin nikel ana fazını kristalli bir yapıdan, amorf bir yapıya dönüştürdüğünü daha önce belirtmiştik. Aynı zamanda bor elementi ile alaşımlama, mikrogerilim ve dislokasyon yoğunluğu değerlerinde de saf nikelde artışa neden olmuştur. Bor elementinin nikel yüzey merkezli kübik (YMK) kristal kafes yapısı içinde ara yerleri işgal etmesiyle birlikte, nanokristalli Ni-B alaşımların, Ni YMK yapısı içinde bor atomlarını ihtiva eden katı bir çözelti olduğunu söyleyebiliriz. Yapıdaki bu değişimin mikrogerilim ve dislokasyon yoğunluğu değerlerinde artışa sebep olduğunu ifade etmek mümkündür [38]. Anayapının TiB<sub>2</sub> parçacıklarla takviye edilmesi, ortalama kristal tane büyüklüğünde bir miktar artışa sebep olmuş ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplama için bu değer 13,8 nm civarlarında

hesaplanmıştır. Bu sonuca göre mikro TiB<sub>2</sub> parçacıkların ana yapı içerisinde Ni-B alaşımı ile kıyas edildiğinde kristalleşmeyi desteklediğini ifade edebiliriz. Fakat saf nikelde göre halen çok daha düşük miktarda bir tane boyutu değeri elde edildiği görülmektedir. Kompozit kaplama için mikrogerilim ve dislokasyon yoğunluğu değerleri Ni-B alaşımına göre bir miktar azalmış olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda iç yapıdaki gerilimin Ni-B alaşımına göre biraz daha azaldığı söylenebilir.



Şekil 4. Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit, Ni-B alaşım ve saf nikel kaplamaların XRD desenleri

Çizelge 3. Saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplamaların XRD desenlerinden elde edilen parametreler

Numune	2θ (derece)	FWHM-β (radyan)	Ortalama kristal tane büyüklüğü-D (nm)	Mikrogerilim-ε	Dislokasyon yoğunluğu-δ (nm <sup>-2</sup> )
Saf nikel	51,8	0,00378	42,6	1,94x10 <sup>-3</sup>	0,551x10 <sup>-3</sup>
Ni-B	44,3	0,01785	8,7	10,9x10 <sup>-3</sup>	13,2x10 <sup>-3</sup>
Ni-B/TiB <sub>2</sub>	44,4	0,01132	13,8	6,9x10 <sup>-3</sup>	5,2x10 <sup>-3</sup>

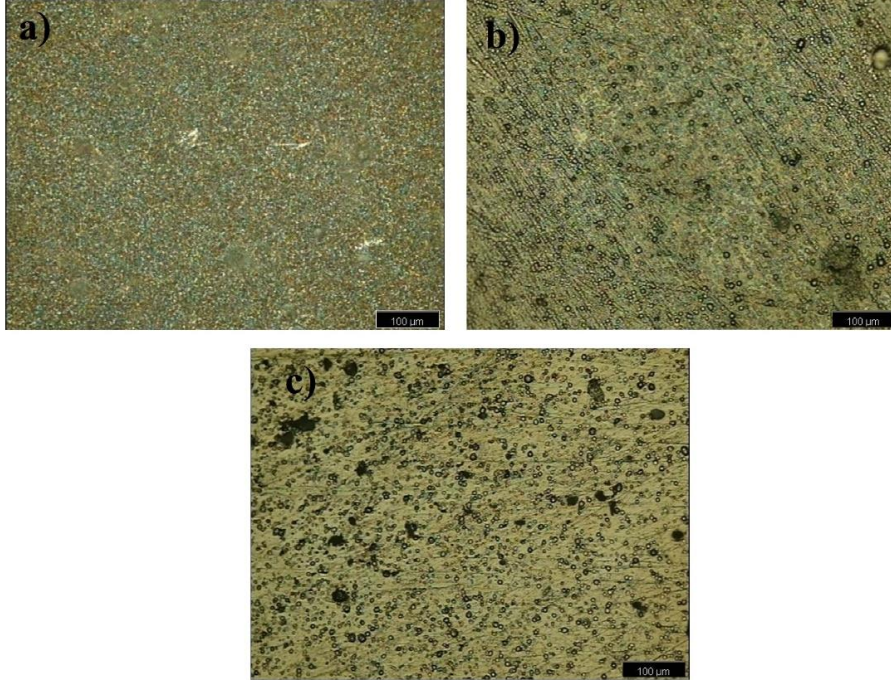
### 3.4. Kaplamaların Morfolojik Analizleri

Şekil 5 ve 6’da Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplama ve mukayese amacıyla saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamaların optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 5’teki görüntüler 200 büyütme oranında, Şekil 6’daki görüntüler ise 500 büyütme oranında elde edilmiştir. Genel olarak üç farklı kaplamanın da gayet düzgün bir yüzeye sahip olduğu söylenebilir. Fakat yüzeye daha yakından bakıldığında saf nikel kaplamanın, diğer

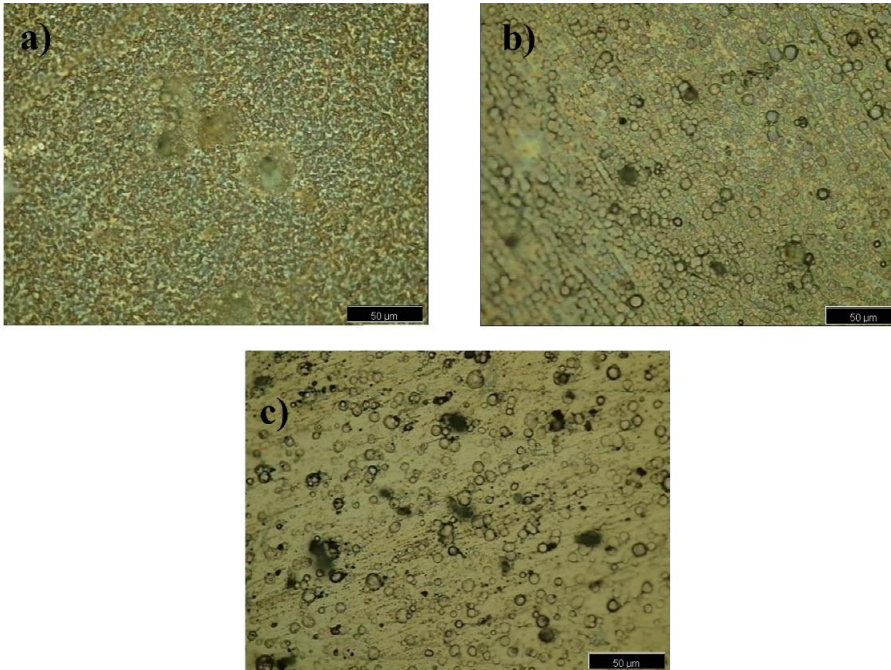
kaplamalara kıyasla daha pürüzlü bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Ni-B alaşım ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplamanın yüzey görünümü saf nikel kaplamadan çok farklı görünmektedir. Ni-B alaşım ve kompozit kaplamanın yüzeyinde dairesel şekilli yapıların çok daha yoğun olduğu anlaşılmaktadır. Saf nikel kaplamada ise yükselti farklılıklarından kaynaklanan, belirsiz şekilli birtakım yapılardan oluşmuş piramidal şekilli bir yüzey görünümü olduğu görülmektedir.



*Elektrokimyasal Depolama Yöntemi ile AISI 304 Çeliği Yüzeyine Biriktirilen Ni-B/TiB<sub>2</sub> Kompozit Kaplamaların Kristal Yapı ve Bazı Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*



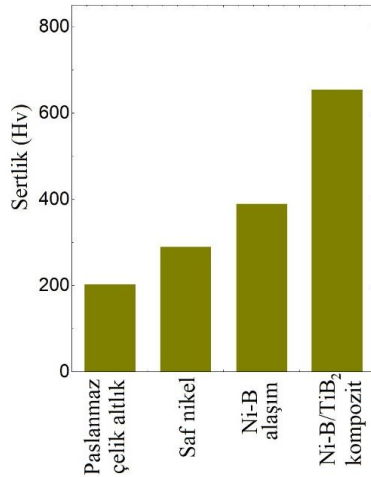
**Şekil 5.** Kaplamaların optik mikroskop görüntüleri a) saf nikel, b) Ni-B alaşım, c) Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit (200 büyütme oranında)



**Şekil 6.** Kaplamaların optik mikroskop görüntüleri a) saf nikel, b) Ni-B alaşım, c) Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit (500 büyütme oranında)

### 3.5. Kaplamaların Mikrosertlik Analizi

Mikro sertlik değerlerinin ölçümünde 500 g'lık yük numune üzerine 10 s boyunca uygulanmıştır. En az 10 farklı noktadan numune üzerinde ölçümler alınmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak mikro sertlik değeri bulunmuştur. Ortalamadan aşırı derecede sapan mikro sertlik değerleri numunenin genel ortalamasına katılmamıştır. Şekil 7'de Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplamayla birlikte karşılaştırma amacıyla paslanmaz çelik altlık, saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamanın mikrosertlik ölçüm sonuçları bir arada verilmiştir. Paslanmaz çelik altlığın sertliği 200 Hv civarlarında ölçülürken, saf nikelin sertlik değeri ise 300 Hv civarlarında ölçülmüştür.



Şekil 7. Altlık ve kaplamaların mikrosertlik değerleri

Saf nikelin bor atomları ile alaşımlanması neticesinde elde edilen Ni-B alaşım kaplamanın sertliği ise 400 Hv civarlarında ölçülmüştür. Ni-B alaşım ana yapının TiB<sub>2</sub> ile takviye edilmesi ile elde edilen kompozit kaplamanın sertliği ise 650 Hv civarlarında elde edilmiştir. Bu durumda takviye parçacıklarla destek işlemi sertlikte paslanmaz çeliğe göre %225, saf nikel'e göre %115 civarında artışa sebep olurken, Ni-B alaşımına kıyasla yaklaşık %60 civarında bir artışla sonuçlanmıştır. Sertlikteki bu artış, Ni-B alaşımına parçacık takviyesi sebebiyle olup bu durum, literatürde Orowan dispersiyon sertleşmesi

mekanizması ile açıklanmaktadır. Sert parçacıkların yapı içindeki varlığı çizgi kusurları (dislokasyon) hareketlerini engellemektedir ve çizgi kusurları pimleme etkisi, dağılmış parçacıkların dayanımını artırma etkisine sebep olmaktadır. Hareket yörüngesinde bulunan parçacıkların yanından geçen bir çizgi kusuru için kritik şart, parçacıklar arasında bir yarım daire şeklinde kendisini bükmesidir. Sonrasında çizgi kusuru ilerlemekte ve çizgi kusuru düğümünü geride bırakmaktadır. Dolayısıyla, çözünmeyen parçacıkların yapıda bulunması, çizgi kusuru pimleme etkisine sebep olmakta ve böylece dayanım ve sertlikte artış meydana gelmektedir [11].

### 3.6. Kaplamaların Aşınma Analizleri

Saf nikel ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplamaların aşınma davranışlarını incelemek amacıyla 2 N yük altında ve 0,25 m/s hızında gerçekleştirilmiştir. İz çapı 10 mm olarak ayarlanmış, deney oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve süresi 400 s ile sınırlandırılmıştır. Aşınma analizinde disk üzerinde bilye (ball on disk) yöntemi kullanılmış ve karşı malzeme olarak, yani bilye olarak 6 mm çapında paslanmaz çelik tercih edilmiştir. Ni-B alaşım kaplama aşırı iç gerginlikten dolayı altlığa tutunamadığı için aşınma analizi yapılamamıştır. Elde edilen bütün Ni-B alaşım numune kaplamalarda çatlaklar, pullanmalar, kavrama ve kıvrılmalar dolayısıyla dengeli bir zemin elde edilememiştir.

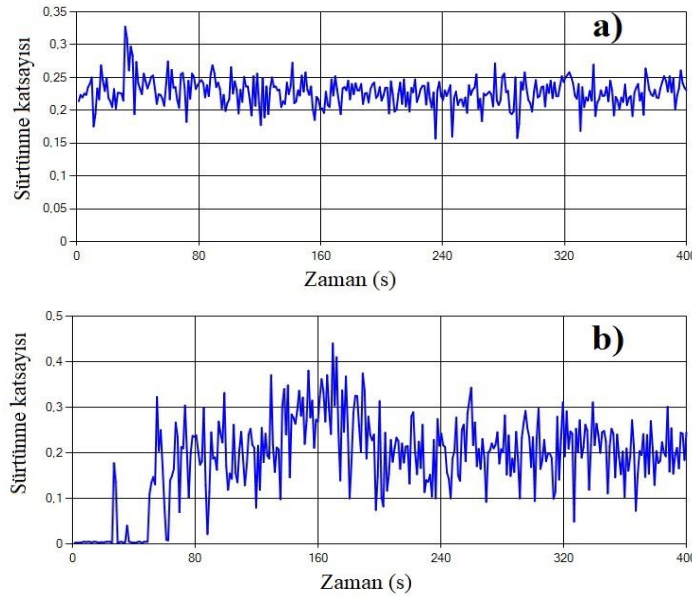
Şekil 8'de saf nikel ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplamaların sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. Şekil 9'da ise numunelerin aşınma deneyi sonrası elde edilen aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Çizelge 4'te ise aşınma analizinden elde edilen veriler özet olarak sunulmuştur. Sürtünme katsayısı grafikleri ve Çizelge 4'te verilen ortalama sürtünme katsayısı verileri beraber değerlendirildiğinde kompozit kaplamanın saf nikel'e göre daha düşük sürtünme katsayısı değerleri sergilediği görülmektedir. Saf nikel için ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,227 elde edilirken, kompozit kaplama için bu değer 0,187 elde edilmiştir. Kompozit kaplamanın TiB<sub>2</sub> parçacıkları ile desteklenmesi sertliği artırmış ve

artan sertliğe ilaveten, ana yapı içerisindeki takviye parçacıklarında katkısıyla sürtünme katsayısında bir miktar azalmaya sebep olmuş olabilir. Şekil 8 a’da verilen grafikte deney süresi boyunca saf nikelin sürtünme katsayısı grafiği genel olarak kompozit kaplamaya kıyasla daha az salınımlı bir seyir izlemektedir. Aynı şekilde b’de gösterilen kompozit kaplamaya ait grafikte ilk başlarda sürtünme katsayısı çok düşük değerlerle başlamış ve ilerleyen sürelerle birlikte yüzeydeki kaygan tabakaların deforme olmasına müteakip artış göstermiştir. Sürtünme katsayısı grafiklerindeki bu yüksek salınımlı seyir, aşınmanın yapışma ve kayma (stick-slip) hareketi yaparak gerçekleştiği izlenimini vermektedir. Yapışma esnasında sürtünme katsayısı önce belli bir maksimum değere kadar artış göstermekte, müteakiben kopmayla birlikte ise sürtünme katsayısında ani düşüş meydana gelmektedir [42,43].

Şekil 9’da verilen aşınma izleri incelendiğinde kompozit kaplamanın saf nikel oranla daha dar bir aşınma izine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Saf nikelin aşınma iz genişliği yaklaşık olarak 400 µm civarlarındayken, kompozit kaplamanın aşınma izi genişliği ise 280 µm civarlarında ölçülmüştür. Aşınma deneyi parametreleri ve aşınma iz genişliğinden elde edilen aşınma hacim kaybı (V) değerleri Çizelge 4’te verilmiştir. Bu değerler aşınma iz genişliği ve bazı deney parametrelerini esas alan aşağıdaki verilen formülden hesaplanmıştır [44] (Eşitlik 4).

$$V = 2\pi R \left[ r^2 \sin^{-1} \frac{w}{2r} - \frac{w}{4} \sqrt{(4r^2 - w^2)} \right] \quad (4)$$

Burada R aşınma deneyi iz yarıçapı, r aşınma deneyinde kullanılan bilye yarıçapı, w ortalama aşınma iz genişliğidir.



**Şekil 8.** Sürtünme katsayısı grafikleri a) saf nikel kaplama, b) Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplama

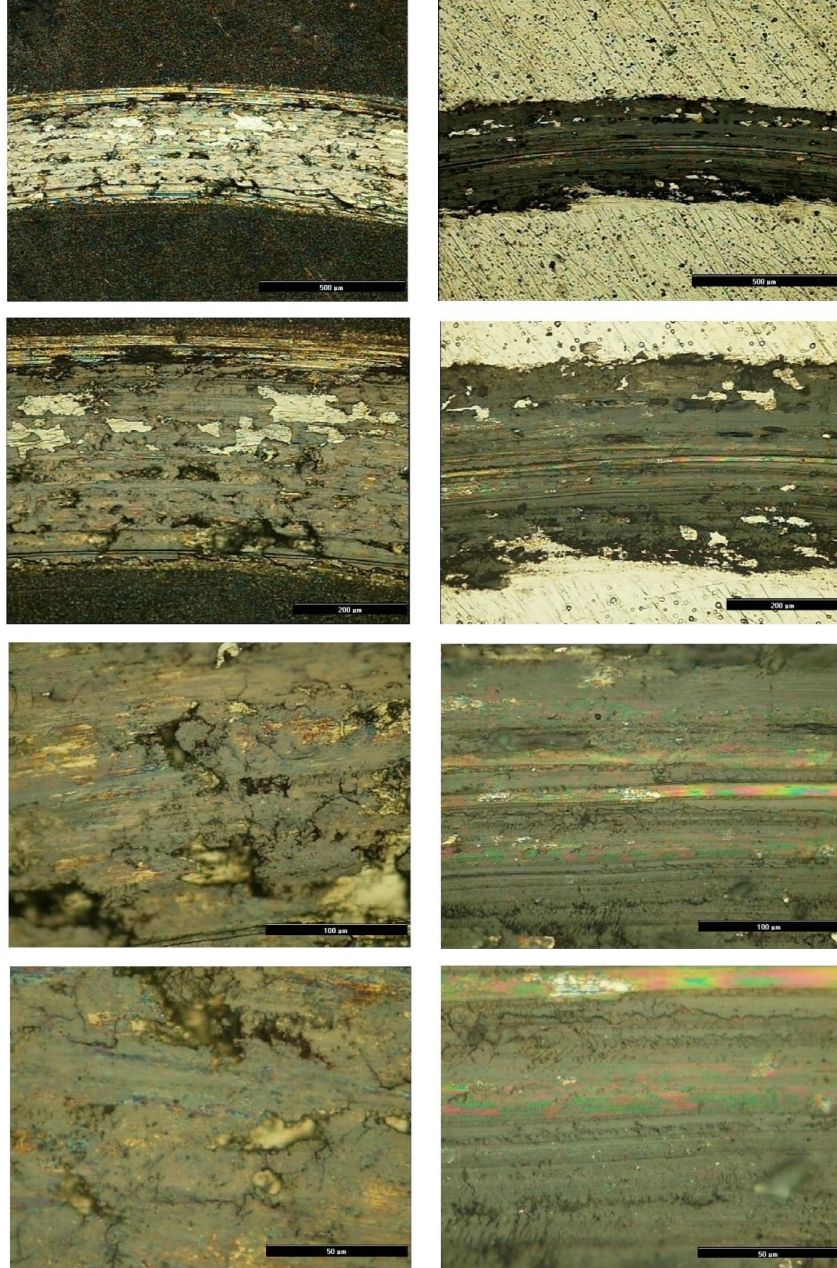
Saf nikel için aşınma hacim kaybı 0,04636 mm<sup>3</sup> olarak hesaplanırken, kompozit kaplama için aşınma hacim kaybı 0,01915 mm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Şekil 9’daki aşınma izleri incelendiğinde saf nikel için plastik deformasyon aşınma mekanizmasının (adesiv) hakim olduğu

görülmektedir. Bunun yanı sıra kompozit kaplamada ise mikro çizilme aşınma mekanizması şeklinde ifade edebileceğimiz abrasiv aşınma türünün hakim olduğu ifade edilebilir. Aşınma esnasında kopan sert parçacıklar iki metal arasında kalarak kazıma etkisi göstermekte ve abraziv



aşınmaya sebep olabilmektedir. Abrasiv aşınmada keskin ve sert parçacıklar malzeme yüzeyinden mikron seviyesinde talaş kaldırabilmektedir. Bu

şekilde aşınan yüzeylerde mikron boyutunda çizikler oluşabilmektedir [45].



Saf nikel

Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit

**Şekil 9.** Saf nikel ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplamaların aşınma izi optik mikroskop görüntüleri (sırasıyla yukardan aşağıya 100, 200, 500 ve 1000 büyütme oranlarında)

**Çizelge 4.** Saf nikel ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplamaların aşınma analizi verileri

Numune	Aşınma iz genişliği (w, mm)	Aşınma hacim kaybı (V, mm <sup>3</sup> )	Ortalama sürtünme katsayısı
Saf nikel	~0,4	0,04636	0,227
Ni-B/TiB <sub>2</sub> kompozit	~0,28	0,01915	0,187

#### 4. SONUÇLAR

Geleneksel elektrodopolama metoduyla Ni-B alaşım ana yapılı ve mikro boyutta TiB<sub>2</sub> parçacıkları ile takviyeli kompozit kaplama elde edilmiş ve yine aynı metotla üretilen saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamalar ile mukayese edilmiştir. Kronopotansiyometri grafiklerine göre elektrolite parçacıkların ilave edilmesi sabit akımda depolanan banyoda potansiyel artışına sebep olmuştur. Saf nikelin bor ile desteklenmesi ortalama kristal tane boyutunu ciddi miktarda azaltırken, takviye parçacıklar tane boyutu değerinin tekrar artış göstermesine sebep olmuştur. Elde edilen kaplamaların morfolojileri birbirinden farklı görünmekle birlikte, genel olarak pürüzsüz düzgün yüzeyli kaplamalar elde edilmiştir. TiB<sub>2</sub> parçacıklarla takviye işlemi mikro sertlikte paslanmaz çeliğe göre %225, saf nikelde göre %115 civarında artışa sebep olurken, Ni-B alaşımına kıyasla yaklaşık %60 civarında bir artışla sonuçlanmıştır. Aşınma analiz sonuçlarına göre kompozit kaplamanın saf nikelde göre aşınma hacim kaybında yaklaşık %50 civarında bir azalma söz konusudur. Ayrıca, saf nikelin sürtünme katsayısı 0,227 olarak elde edilirken, kompozit kaplamanın sürtünme katsayısı 0,187 olarak elde edilmiştir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenmiştir. (Proje ID: 12868)

#### 6. KAYNAKLAR

1. Vitry, V., Francq, E., Bonin, L., 2019. Mechanical Properties of Heat-Treated Duplex Electroless Nickel Coatings. *Surface Engineering*, 35, 159-67.
2. Salehikahrizsangi, P., Raeissi, K., Karimzadeh, F., Calabrese, L., Patane, S., Proverbio, E., 2018. Erosion-corrosion Behavior of Highly Hydrophobic Hierarchical Nickel Coatings. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 558, 446-54.
3. Tozar, A., Karahan, İ.H., 2019. Investigation of the Mechanical Properties of Ni-B/hBN Composite Coatings Electrodeposited in Presence of CTAB as the Surfactant. *Material Research Express*, 6(12), 12.
4. Li, B.S., Zhang, W.W., Li, D.D., Huan, Y.X., Dong, J., 2018. Microstructural, Surface and Electrochemical Properties of a Novel Ni-B/Ni-W-BN Duplex Composite Coating by Co-Electrodeposition. *Applied Surface Science*, 458, 305–318.
5. Matsui, I., Omura, N., Yamamoto T., Takigawa Y., 2018. Electrodeposition with Intermittent Addition of Trimethylamine Borane to Produce Ductile Bulk Nanocrystalline Ni-B Alloys. *Surface & Coatings Technology*, 337, 411–417.
6. Mukhopadhyay, A., Barman, T.K., Sahoo, P., 2017. Effects of Heat Treatment on Tribological Behavior of Electroless Ni-B Coating at Elevated Temperatures. *Surface Review Letters*, 24, 22.
7. Srinivasan, K.N., Meenakshi, R., Santhi, A., Thangavelu, P.R., John, S., 2010. Studies on Development of Electroless Ni-B Bath for Corrosion Resistance and Wear Resistance Applications. *Surface Engineering*, 26, 153-158.
8. Hu, C., Xu, M., Zhang, J., Hu, B., Yu, G., 2019. High Corrosion Resistance of Electroless Ni/Ni-B Coating from Fluoride-free Baths on AZ31 Magnesium Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 770, 48-57.
9. Koch, C.C., 2007. Structural Nanocrystalline Materials: an Overview, *J. Mater. Sci.* 42(5), 1403-1414.



10. Ünal, E., Yaşar, A., Karahan, İ.H., 2019. A Review of Electrodeposited Composite Coatings with Ni-B Alloy Matrix. *Materials Research Express*, 6, 092004.
11. Shakoor, R.A., Kahraman, R., Waware, U.S., Wang, Y., Gao, W., 2014. Properties of Electrodeposited Ni-B-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings. *Materials and Design*, 64, 127-135.
12. Cho, H.J., Kim, Y.J., Erb, U., 2018. Thermal Conductivity of Copper-diamond Composite Materials Produced by Electrodeposition and the Effect of TiC Coatings on Diamond Particles. *Composite Part B-Engineering*, 155, 197-203.
13. Ünal, E., Karahan, İ.H., 2018. Production and Characterization of Electrodeposited Ni-B/hBN Composite Coatings. *Surface & Coatings Technology*, 333, 125-137.
14. Zhang, W., Li, B., 2018. Influence of Electrodeposition Conditions on the Microstructure and Hardness of Ni-B/SiC Nanocomposite Coatings. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 13(4), 3486-3500.
15. Waware, U.S., Hamouda, A.M.S., Pradhan, A.K., 2018. Effect of Codeposition of Mixed Nanoparticles (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and ZrO<sub>2</sub>) on the Structure and Properties of Ni-B Nanocomposite Coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 752, 253-259.
16. Waware, U.S., Hamouda, A.M.S., Bajaj, B., Borkar, T., Pradhan, A.K., 2018. Synthesis and Characterization of Electrodeposited Ni-B-Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 769, 353-359.
17. Waware, U.S., Hamouda, A.M.S., Wasekar, N.P., 2018. Mechanical Properties, Thermal Stability and Corrosion Behavior of Electrodeposited Ni-B/AlN Nanocomposite Coating. *Surface & Coatings Technology*, 337, 335-341.
18. Monteiro, O.R., Murugesan, S., Khabashesku, V., 2015. Electroplated Ni-B Films and Ni-B Metal Matrix Diamond Nanocomposite Coatings. *Surface & Coatings Technology*, 272, 291-297.
19. Li, B., Zhang, W., 2020. Facile Synthesis and Electrochemical Properties of a Novel Ni-B/TiC Composite Coating via Ultrasonic-Assisted Electrodeposition. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 61, 104837.
20. Li, D., Li, B., Du, S., Zhang, W., 2019. Synthesis of a Novel Ni-B/YSZ Metal-Ceramic Composite Coating via Single Step Electrodeposition at Different Current Density. *Ceramics International*, 45, 24884-24893.
21. Krishnaveni, K., Narayanan, T.S.N.S., Seshadri, S.K., 2009. Wear resistance of Electrodeposited Ni-B and Ni-B-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composite Coatings. *J. Mater. Sci.*, 44, 433-440.
22. Ett, G., Pessine, E.J., 1999. Pulse Current Plating of TiB<sub>2</sub> in Molten Fluoride. *Electrochimica Acta*, 44, 2859-2870.
23. Gyawali, G., Cho, S.H., Lee, S.W., 2013. Electrodeposition and Characterization of Ni-TiB<sub>2</sub> Composite Coatings. *Metals and Materials International*, 19(1), 113-118.
24. Gyawali, G., Tripathi, K., Joshi, B., Lee, S.W., 2017. Mechanical and Tribological Properties of Ni-W-TiB<sub>2</sub> Composite Coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 721, 757-763.
25. Lee, K.B., Yoo, S.H., Kim, H.S., Won, S.O., Yang, B.J., Ahn, J.P., Choi, H.J., 2017. Nitridation-Assisted Al Infiltration for Fabricating Al Composites. *Journal of Materials Science*, 52, 4333-4344.
26. Huang, X., Zhao, Z., Zhanga, L., Yin, C., Wu, J., 2014. Microstructure Modification and Fracture Behavior of Solidified TiC-TiB<sub>2</sub> Ceramic Prepared by Combustion Synthesis in Ultra-High Gravity Field. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2, 144-149.
27. Huang, X., Sun, S., Tu, G., Lu, S., Li, K., Zhu, X., 2017. The Microstructure of Nanocrystalline TiB<sub>2</sub> Films Prepared by Chemical Vapor Deposition. *Materials*, 10(12), 1425.
28. Urszula, D.W., Agnieszka, T., Bogusław, R., 2017. Vibrational Spectroscopy of Binary Titanium Borides: First-Principles and Experimental Studies. *Advances in Condensed Matter Physics*, 18, 1-9.
29. Luo, P., Donga, P., Yanglib, A., Sunc, S., Zhengb, Z., Wang, H., 2015. Electrospark Deposition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiB<sub>2</sub>/Ni Composite-Phase Surface Coatings on Cu-Cr-Zr Alloy

- Electrodes. Journal of Asian Ceramic Societies, 3, 103–107.
30. Boukhoubza, I., Khenfouch, M., Achehboune, M., Mothudi, B.M., Zorkani, I., Jorio A., 2019. X-ray Diffraction Investigations of Nanostructured ZnO Coated with Reduced Graphene Oxide. Journal of Physics, 1292, 012011.
31. Bindu, P., Thomas, S., 2014. Estimation of Lattice Strain in ZnO Nanoparticles: X-ray Peak Profile Analysis. Journal of Theoretical and Applied Physics, 8, 123-134.
32. Saleem, M., Fang, L., Ruan, H.B., Wu, F., Huang, Q.L., Xu, C.L., Kong, C.Y., 2012. Effect of Zinc Acetate Concentration on the Structural and Optical Properties of ZnO Thin Films Deposited by Sol-Gel Method International. Journal of Physical Sciences, 7(23), 2971-2979.
33. Bilgin, V., Köse, S., Atay, F., Akyüz, I., 2005. The Effect of Substrate Temperature on the Structural and Some Physical Properties of Ultrasonically Sprayed CdS Films. Materials Chemistry and Physics 94, 103-108.
34. Khan, Z. R., Zulfeqar, M., Khan, M.S., 2010. Optical and Structural Properties of Thermally Evaporated Cadmium Sulphide Thin Films on Silicon (100) Wafers. Materials Science and Engineering B, 174, 145-149.
35. Williamson, G.B., Smallman, R.C., 1956. Dislocation Densities in Some Annealed and Cold-worked Metals from Measurements on the x-ray Debye-scherrer Spectrum. Philosophical Magazine A, Series 8, 1, 34-46.
36. Patterson, A.L., 1939. The Scherrer Formula for X-ray Particle Size Determination. Physical Review, 56, 978-982.
37. Gyawali, G., Kim, H.S., Tripathi, K., Kim, T.H., 2014. Fabrication and Characterization of Electrodeposited Ni-SiC-hBN Composite Coatings. J. Mater. Sci. Technol., 30(8), 796-802.
38. Bekish, Y.N., Poznyak, S.K., Tsybulskaya, L.S., Gaevskaya, T.V., 2009. Electrodeposited Ni-B Alloy Coatings; Structure, Corrosion Resistance and Mechanical Properties. Electrochimica Acta, 55, 2223-2231.
39. Gyawali, G., Lee, S.W., 2015. Effect of SiC and hBN Codeposition on Microstructural and Tribological Properties of Ni-SiC-hBN Composite Coatings. Ceramic Processing Research, 16(2), 213-217.
40. Oghihara, H., Udagawa, K., Saji, T., 2011. Effect of Boron Content and Crystalline Structure on Hardness in Electrodeposited Ni-B Alloy Films, Surface&Coatings Technology. 206, 2933-2940.
41. Wang, Y., Wang, S., Shu, X., Gao, W. Lu, W., Yan, B., 2014. Preparation and Property of Sol-Enhanced Ni-B-TiO<sub>2</sub> Nano-Composite Coatings. J. of Alloys and Compounds, 617, 472-478.
42. Ağdacı, G.E., 2019. Dökme Demir-nikel Alüminat-bronz Tabakalı Kompozitin Sürtünme ve Aşınma Davranışları. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 82.
43. Özmen, Y., Jahanmir S., 2015. Sulu Ortamda Silisyum Nitrid Üzerindeki Nanoyapılı Yüzeylerin Çok Düşük Sürtünme Özellikleri. Pamukkale Üniv. Müh. Bilim. Derg., 21(8), 337-343.
44. ASTM G99-05, 2005. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA.
45. Günen A., 2012. Nano Bor Tozu ile Yüzeyi Alaşımlandırılan Östenitik Paslanmaz Çeliğin Mekanik Özellikler ve Korozyon Davranışının Araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, 223.

## Hayvansal Lif Karışımli Kumaşların Isıl Tuşesi Üzerine Bir Araştırma

Seval UYANIK\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-9513-5746

<sup>1</sup>Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adıyaman

Geliş tarihi: 03.08.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: UYANIK, S., (2021). Hayvansal Lif Karışımli Kumaşların Isıl Tuşesi Üzerine Bir Araştırma. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 861-868.

### Öz

Tekstil sektöründe çevreye duyarlı ürünlere talebin artması doğal liflere ve dolayısıyla hayvansal liflere olan ilgiyi artırmıştır. Ancak hayvansal lifler ihtiyacı karşılama oranlarının düşük olması sebebiyle oldukça pahalı olup tekstil sektöründe genellikle düşük oranlarda diğer liflerle karışım halde kullanılmaktadır. Giysi konforu, son yıllarda oldukça önemli bir kavram haline gelmiş ve konforu yüksek giysiler çok daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Kumaşların ısıl davranış özelliklerinin, giysi konforunu etkilediği bilinmektedir. Bu çalışmada hayvansal lif içeren kumaşların ısıl soğurganlık özelliklerinin yani dokunma yolu ile kullanıcıya verdiği sıcak veya soğuk hissini ifade eden ısıl tuşesinin ortaya koyulması amaçlanmıştır. Çalışma sonuçları kumaşlarda ısıl soğurganlığın; ısıl iletkenlik, lif cinsi ve sıklık, gramaj, kalınlık gibi kumaş yapı parametrelerinden etkilendiğini ortaya koymuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Hayvansal lif, Viskon lifi, Giysi konforu, Isıl soğurganlık (termal efüzyon), Kumaş yapı parametreleri

### A Research on Thermal Effusivity of Blend Fabrics with Animal Fibers

#### Abstract

The increase in the demand for environmentally friendly products in the textile sector has enhanced the interest in natural fibers and therefore animal fibers. However, animal fibers are quite expensive due to their low rate of meeting the needs, and they are generally used in low ratios in the textile industry as a mixture with other fibers. Clothing comfort has become a very important concept in recent years and clothes with high comfort have begun to be preferred more and more. It is known that thermal behavior properties of fabrics affect clothing comfort. In this study, it is aimed to reveal the thermal absorptivity (thermal effusivity) properties of fabrics containing animal fiber, that is, the thermal touch, which expresses the warm or cold feeling it gives to the user by touch. The results of the study showed that the thermal effusivity of the fabrics is affected by thermal conductivity, fiber type and fabric structure parameters such as density, weight, and thickness.

**Keywords:** Animal fibers, Viscose fiber, Clothing comfort, Thermal absorptivity (thermal effusivity), Fabric structure parameters

---

\*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Seval UYANIK, suyanik@adiyaman.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Tekstil sektörü kullanılan lifler açısından son derece zengin olup bitkisel ve hayvansal içerikli doğal lifler ile rejenere veya sentez yoluyla elde edilen yapay lifler olmak üzere birçok lif çeşidi bulunmaktadır.

Son yıllarda çevreye duyarlı ürünlere talebin artması doğal liflere olan ilgiyi artırmıştır. Ancak doğal liflerin kullanım oranı üretim kapasiteleriyle sınırlıdır ve bitkisel liflerle kıyaslandığında hayvansal liflerin ihtiyacı karşılama oranları oldukça düşüktür. Bu nedenle hayvansal lifler oldukça pahalı olup lüks lifler sınıfına girmektedir. Tekstil sektöründe de genellikle düşük oranlarda diğer liflerle karışım halde kullanımları yaygındır.

Hayvansal liflerin temel yapı taşı protein olup hafiflik, yumuşak tuşe, sıcak tutma, kolay ütülenebilirlik gibi olumlu özellikleri nedeniyle tercih edilirler [1].

Belli başlı hayvansal lifler; yün, ipek, tiftik kaşmir, angora ve deve soyu lifleri olup bunlardan ipek lifi salgı kökenli iken diğerleri deride meydana gelen liflerdir.

Giysi konforu, son yıllarda oldukça önemli bir kavram haline gelmiş ve konforu yüksek giysiler çok daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır.

Araştırmacılar tarafından giysi konforunun; vücudun termal dengesi ile yakından ilgili olduğu ve lif-iplik özellikleri, kumaş yapı parametreleri ve terbiye işlemlerinin ısı konfor özelliklerini etkileyen faktörler olduğu belirtilmiştir [2-11].

Hayvansal liflerin en önemli özelliklerinden ısı tutma yeteneği, ısı özellik olduğu için giysi konforu ile doğrudan ilişkilidir.

Üte ve arkadaşları [12] çalışmalarında doğal renkli pamuk ile angora tavşanı lifini karıştırarak elde ettikleri ipliklerle bir yüzü %100 renkli pamuk olan diğer yüzü ise doğal renkli pamuk/angora karışımı çift yüzü örme kumaşlar üretmişlerdir. Elde edilen ipliklerde tüylülük ve mukavemetin arttığını, düzgünlüğün azaldığını, diğer yandan

üretile kumaşlarda angora oranının artmasıyla su buharı geçirgenliğinin düştüğünü ve ancak yüksek ısı özellikleri nedeniyle angora oranı yüksek karışım ipliklerin tercih edilebileceğini belirtmişlerdir.

Üte ve arkadaşları [13] bir diğer çalışmalarında, farklı karışım oranlarında yün/pamuk ve ipek/pamuk karışımı ipliklerden üretilmiş süprem örme kumaşların iç giysilik olarak kullanımını konfor özellikleri açısından araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, kumaşlarda yün lif oranı arttıkça yalıtım özelliklerinin iyileştiğini, ipek karışımı kumaşların ise yüksek su buharı geçirgenliği, ısı soğurganlık ve su emicilik özellikleri ile terlemenin yoğun olarak ortaya çıktığı yoğun aktivite koşulları için uygun olduğunu ortaya koymuşlardır.

Oğlakçıoğlu ve arkadaşları [14] tarafından yapılan çalışmada, ring ve open-end iplik eğirme sistemleriyle üretilmiş pamuk/angora karışımı iplikler örülerek elde edilen süprem kumaşların ısı konfor özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonuçları karışımdaki angora miktarının artırılması ile ısı konfor özelliklerinin azaldığını, ring eğirme ile üretilen kumaşın tuşesinin ve ısı yalıtımının open-end eğirme ile üretilen kumaştan daha üstün olduğunu göstermiştir.

Mumcu ve arkadaşları [15] yaptıkları çalışma ile ring ve vortex eğirme sistemlerinde viskon lifi ile karışım halde yün ve kaşmir liflerini farklı oranlarda kullanmak suretiyle Ne 30 iplikler üretilmiş ve bu ipliklerle üretilen kumaşların hava geçirgenliği ve boncuklanma direncini araştırmışlardır. Araştırma sonuçları; iplik eğirme sistemi, lif tipi ve karışım oranlarının kumaş performansı üzerine önemli oranda etki ettiğini ortaya koymuştur.

Malzemelerin ısı konfor özelliklerinin değerlendirilmesinde ısı iletkenlik ve ısı soğurganlık ölçümleri oldukça önemli yer tutmaktadır. Isı iletkenlik ( $\lambda$ ), birim kalınlıkta malzemenin, 1 Kelvin sıcaklık farklılığında geçen ısı miktarı [9] iken ısı soğurganlık, malzemenin çevresi ile termal enerji alışverişi yapma yeteneğidir ve malzemelerin soğukluk veya

sıcaklık hissini ifade eden yarı kalitatif ölçümdür [16] (Eşitlik 1).

$$\text{Isıl soğurganlık (e)} = \sqrt{(\lambda \rho c_p)} \quad (1)$$

Formülde;

$\lambda$ - ısı iletkenlik

$\rho$ - yoğunluk

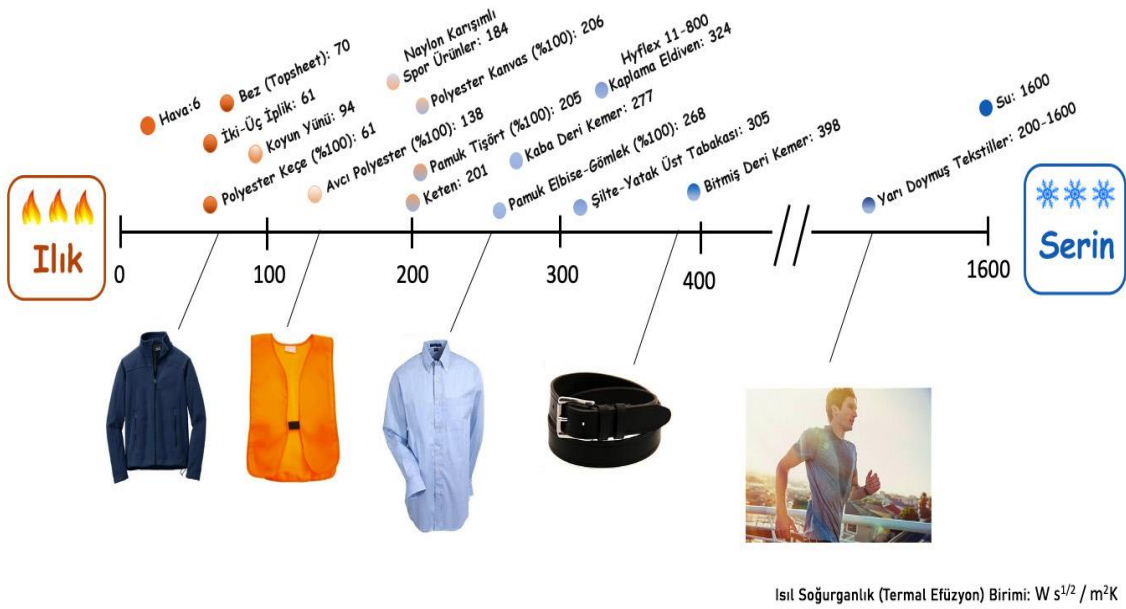
$c_p$ - özgül ısı kapasitesi

$\rho.c_p$ - hacimsel ısı kapasitesi

Isıl efüzyon, kullanım amacına uygun olarak tekstil malzemelerinin seçimi ve kalitesi açısından

dikkate alınması gereken ve nihai olarak ürün performansını etkileyen bir özellik olup düşük ısı efüzyona sahip malzemeler daha sıcak, daha yüksek ısı efüzyona sahip malzemeler daha soğuk hissedilir [17].

Çeşitli tekstil ürünlerinin efüzyon değerleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekle göre ısı soğurganlık değeri  $> 200 - 280 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$  olan malzemeler 'soğuk' hissi, efüzyon değeri  $< 65 - 100 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$  olan malzemeler ise 'ılık' hissi veren malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır [17].



Şekil 1. Çeşitli tekstil ürünlerinde ısı soğurganlık değerleri [17]

Bu çalışma kapsamında ise önceki çalışmalardan farklı olarak hayvansal lif içeren karışım ipliklerle örülen süprem kumaşlarda ısı iletkenlik ve efüzyon (soğurganlık) özellikleri, hayvansal lif içermeyen süprem kumaş ile karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve hayvansal lif cinsi ve oranının belirtilen ısı özellikler üzerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Hayvansal lif içeren kumaşların ısı soğurganlık kapasitesinin yani dokunma yolu ile kullanıcıya verdiği sıcak veya soğuk hissini ifade eden ısı tuşe özelliğinin ortaya koyulması açısından mevcut

çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı ön görülmektedir.

## 2. MATERYAL VE METOT

Çalışma kapsamında ilk aşamada, ana lif olarak viskon (CV) ile hayvansal lif bileşeni olarak yün (WO) ve kaşmir lifleri (WS) kullanılmak suretiyle farklı karışım oranlarında Ne 30 numara iplikler Murata Vortex (MVS) eğirme sisteminde üretilmiştir. Çizelge 1'de elde edilen ipliklerin özellikleri verilmiştir.

## Hayvansal Lif Karışımı Kumaşların Isıl Tuşesi Üzerine Bir Araştırma

İkinci aşamada elde edilen iplikler Faycon CKM 01-S laboratuvar tipi, makine inceliği 18 iğne/inç (E18) olan yuvarlak örgü makinesinde örülmüştür. Örgü kumaşların yapısal özellikleri olan sıra-

çubuk sıklıkları, gramaj ve kalınlık değerleri sırasıyla ilgili standartlara [18-20] göre belirlenmiş olup kumaş numunelerinin yapısal özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** İplik özellikleri

	Düzensizlik %CV	İnce yer -50%	Kalın yer +50%	Neps +200%	Tüylülük H	Uzama %	Mukavemet cN/tex
%100 CV	12,74	3,30	11,70	5,00	3,99	11,26	14,65
%90/10 CV/WO	13,91	20,00	25,60	38,10	4,37	9,10	12,01
%80/20 CV/WO	14,30	25,60	31,30	17,50	4,48	7,49	10,91
%90/10 CV/WS	13,52	14,40	11,30	10,00	4,33	9,00	12,18
%80/20 CV/WS	15,94	63,30	147,50	273,30	4,93	8,14	10,78

**Çizelge 2.** Yapısal kumaş özellikleri

Kumaş cinsi	İlmeğin sıra sayısı/cm (cpc)	İlmeğin çubuk sayısı/cm (wpc)	İlmeğin yoğunluğu* ilmeğin/cm <sup>2</sup>	Gramaj g/m <sup>2</sup>	Kalınlık mm
%100 CV	14,67	9,00	132,03	100,30	0,47
%90/10 CV/WO	16,50	9,00	148,50	107,13	0,48
%80/20 CV/WO	17,33	9,17	158,92	109,90	0,50
%90/10 CV/WS	16,10	9,00	144,90	101,92	0,53
%80/20 CV/WS	17,50	9,40	164,50	105,14	0,56

(\*İlmeğin yoğunluğu = cpc x wpc)

Elde edilen kumaşların ısı iletkenlik ve soğurganlık değerleri, C-Therm-TCI cihazı ile ASTM D7984-16 standardına göre [21] tespit edilmiştir. Her bir numune için 5'er ölçüm yapılmış ve sonuçların ortalama değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çalışma sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi amacıyla SPSS 21 paket programı yardımıyla %95 güven aralığında ANOVA ve Pearson korelasyon testleri uygulanmıştır.



**Şekil 2.** C-Therm-TCI ısı iletkenlik-soğurganlık test cihazı

**Çizelge 3.** Kumaşların ısı soğurganlık ve iletkenlik sonuçları

	Isıl Soğurganlık W/(s/m <sup>2</sup> K)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Ortam Sıcaklığı T (°C)	Delta T (°C)	V0 (mV)
%100 CV	24	0,040	20,73	1,47	2.450,03
%90/10 CV/WO	130	0,070	20,71	1,35	2.449,24
%80/20 CV/WO	131	0,070	20,89	1,35	2.449,70
%90/10 CV/WS	136	0,073	20,68	1,35	2.449,27
%80/20 CV/WS	128	0,070	21,01	1,35	2.449,74

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3'te verilen grafikten ısı iletkenlik sonuçları incelendiğinde; saf viskon kumaşın ısı iletkenlik değerinin hayvansal lif içeren kumaşlardan düşük olduğu, diğer hayvansal lif içeren kumaşların ise aynı iletkenlik değerine sahip iken sadece %10 kaşmir içeren kumaşın biraz daha yüksek iletkenliğe sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 4'te verilen ANOVA sonuçları ( $p_{wo}=0,296$ ;  $p_{ws}=0,126$ ) hayvansal liflerin ısı iletkenlik üzerinde fark yaratmadığını gösterirken Çizelge 5'te verilen Pearson korelasyon sonuçları ( $r=-0,697^{**}$ ) viskon oranı ile ısı iletkenlik arasında ters yönlü ve kuvvetli bir ilişki olduğunu, viskonun artmasıyla iletkenlik değerinin azaldığını ortaya koymuştur.

Kumaş yapısal parametreleri açısından ANOVA sonuçları ( $p=0,009$ ) ilmek yoğunluğunun ısı iletkenlik üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Pearson korelasyon sonuçları ( $r=0,561^*$ ;  $r=0,479^*$ ;  $r=0,431^*$ ) ilmek yoğunluğu, gramaj ve kalınlık parametreleri ile ısı iletkenlik arasında pozitif yönlü ve orta kuvvetli ilişkilerin olduğunu ve bu parametrelerin değerlerinin artmasıyla iletkenlik değerinin de arttığını ifade etmektedir.

Numune kumaşların ısı soğurganlık değerlerini içeren Şekil 4'te verilen grafiğe göre %100 viskon kumaş hayvansal lif içeren kumaşlardan çok daha düşük soğurganlık değerine sahipken %10 kaşmir lifi içeren kumaş diğer yün ve kaşmir liflerini içeren kumaşlardan biraz daha yüksek soğurganlık değerine sahiptir.

ANOVA sonuçlarına (Çizelge 4) göre viskon lifi ( $p=0,000$ ) ile kumaş yapı parametrelerinden ilmek yoğunluğu ( $p=0,011$ ), gramaj ( $p=0,002$ ) ve kumaş yoğunluğu ( $p=0,002$ ), ısı soğurganlık üzerinde etkili gözükmektedir.

Pearson korelasyon sonuçları da viskon lifi ( $r=-0,719^{**}$ ) ile ısı soğurganlık arasında kuvvetli ve ters yönlü bir ilişki olduğunu diğer taraftan ilmek yoğunluğu ( $r=0,564^{**}$ ), gramaj ( $r=0,513^{**}$ ) ve kalınlık ( $r=0,433^*$ ) ile ısı soğurganlık arasında

orta kuvvetli ve pozitif yönlü bir ilişki işaret etmektedir.

Malzemelerin ısı soğurganlığı, formül 1'de verilen eşitlikten görüldüğü üzere o malzemeye ait ısı iletkenlik, yoğunluk ve özgül ısı değerleriyle doğru orantılıdır. Şekil 3 ve 4 incelendiğinde ısı iletkenlik ve soğurganlık değerlerinin söz konusu ifadeyi destekler nitelikte olduğu ve iletkenlik arttıkça soğurganlığın da arttığı açıkça görülmektedir.

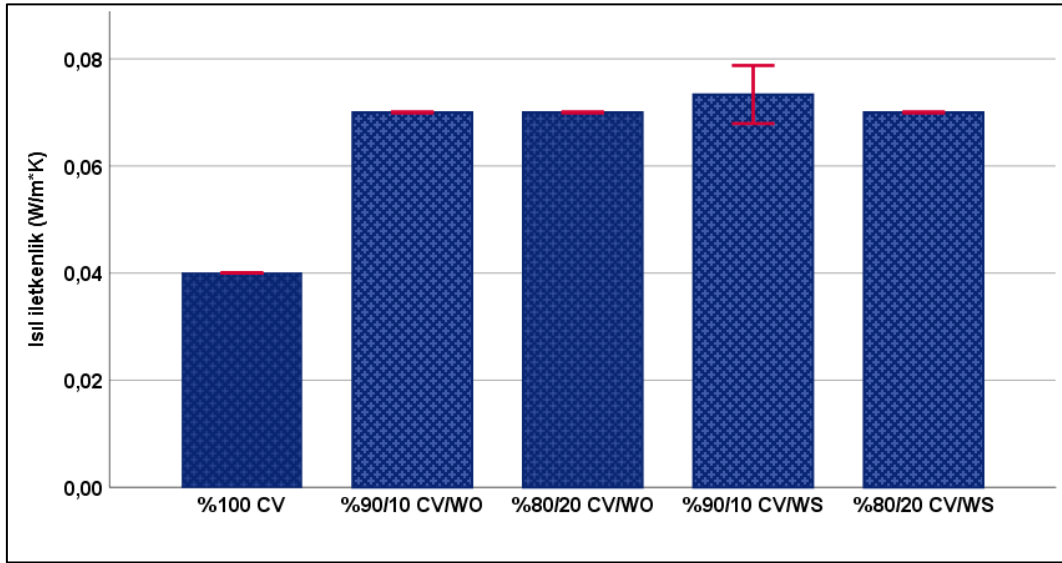
Özgül ısı değerlerinin pamuk lifinde 1,21 J/gK, rayon liflerinde (viskon, modal vb.) 1,26 J/gK, yün lifinde 1,36 J/gK ve ipek lifinde 1,38 J/gK olduğu bilinmektedir [3]. Buna göre hayvansal liflerin özgül ısı değerlerinin selülozik liflerinkinden daha yüksek olmasının bir sonucu olarak hayvansal lif içeren numune kumaşlarda %100 viskon kumaşa göre daha yüksek ısı soğurganlık değerleri gözlenmiştir.

Isı soğurganlığı etkileyen diğer bir parametre olan kumaş yoğunluğu, kumaş yapı özelliklerinin bileşimidir ve her bir yapısal özellik yoğunluğa ve dolayısıyla ısı soğurganlığa tesir etmektedir. İstatistiksel değerlendirmeler de ilmek yoğunluğu, gramaj ve kalınlık gibi yapısal parametrelerin ısı soğurganlığı etkilediğini ortaya koymuştur. Böylece kumaşta yoğunluk artışına neden olan sıklık (ilmek yoğunluğu), gramaj ve kalınlık değerlerindeki artış çalışma sonuçlarında görüldüğü gibi ısı soğurganlığın artmasını sağlamıştır.

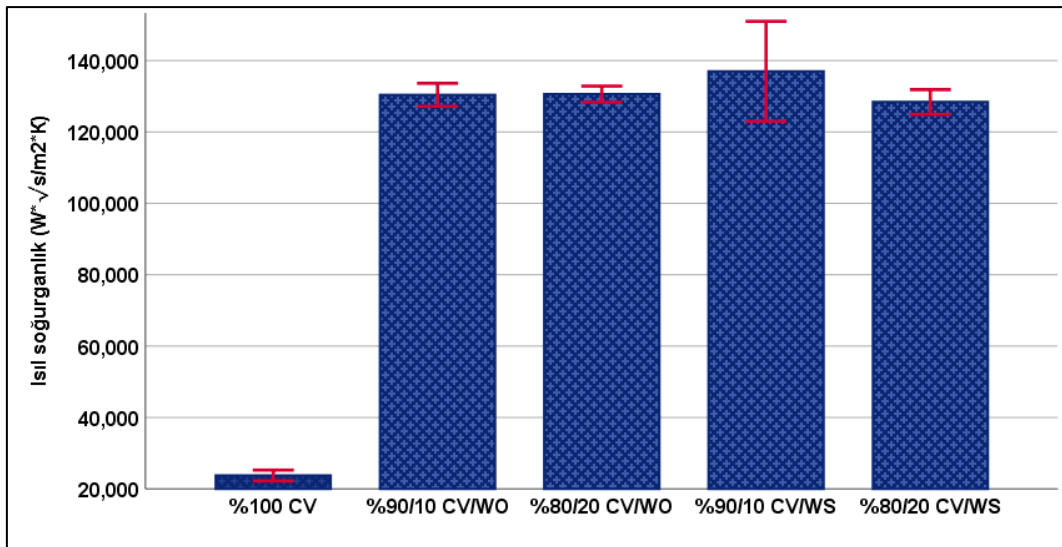
Dokunsal his yani malzemeye el ile temasta verdiği sıcak veya soğuk hissinin bir ifadesi olan ısı soğurganlık; kumaşın gözeneklilik, yüzey yapısı, temas yüzeyi ile de bağlantılıdır [22]. Numune kumaşların ısı soğurganlık ölçüm sonuçlarına göre Şekil 1 incelendiğinde %100 viskon kumaşın en düşük değer ile hayvansal lif içeren viskon kumaşlara göre sıcak hissi verdiği diğer tüm kumaşların ise birbirine yakın değerler ile ılık hissi verdiği görülmektedir. Şekil 1 açısından değerlendirmede %100 viskon kumaşın selülozik kökenli olması nedeniyle pamuk ve keten malzemelere yakın bir şekilde daha yüksek ısı soğurganlık değerlerine sahip olması beklenirken

çalışmada çok daha düşük değer gözlenmiştir. Bu durumun, %100 viskon kumaşın ilmek yoğunluğunun çok düşük olması ve bunun sonucu olarak gözenek yoğunluğunun yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Başka bir ifadeyle sıklığın düşük olması kumaş gözenekleri arasında hava varlığının daha fazla olmasını ve böylece ısı soğurganlık değeri çok düşük olan havanın

(6  $W\sqrt{s}/m^2K$ ) bulunduğu viskon kumaşın soğurganlık değerini düşürdüğü anlaşılmaktadır. Hayvansal lifler açısından ise yün ve kaşmir lifleri içeren kumaşların ısı soğurganlık değerlerinin yakın olması, söz konusu liflerin ısı soğurganlık açısından birbirlerinden pek farklı olmadığını göstermiştir.



Şekil 3. Numune kumaşların ısı iletkenlik sonuçları



Şekil 4. Numune kumaşların ısı soğurganlık sonuçları



**Çizelge 4.** ANOVA sonuçları

Değişken	Isıl İletkenlik		Isıl Soğurganlık	
	F	Anlamlılık	F	Anlamlılık
CV	<b>217,556</b>	<b>0,000</b>	<b>396,180</b>	<b>0,000</b>
WO	0,936	0,407	1,286	0,296
WS	2,827	0,081	2,280	0,126
İlmek yoğunluğu	<b>4,683</b>	<b>0,009</b>	<b>4,495</b>	<b>0,011</b>
Gramaj	-	-	<b>432,724</b>	<b>0,002</b>
Kalınlık	1,217	0,369	1,354	0,304
Yoğunluk	-	-	<b>432,724</b>	<b>0,002</b>

**Çizelge 5.** Pearson korelasyon sonuçları

Faktör	Isıl İletkenlik	Isıl Soğurganlık
CV	-0,697**	-0,719**
WO	0,257	0,298
WS	0,363	0,342
İlmek yoğunluğu	0,561**	0,564**
Gramaj	0,479*	0,513**
Kalınlık	0,431*	0,433*
Yoğunluk	-0,188	-0,176

\*\* . Korelasyon 0.01 düzeyinde anlamlıdır (2-yönlü).

\* . Korelasyon 0.05 düzeyinde anlamlıdır (2-yönlü).

#### 4. SONUÇLAR

Çalışmada hayvansal lif içeren kumaşların termal efüzyon (ısıl soğurganlık) kapasitesinin yani dokunma yolu ile kullanıcıya verdiği sıcak veya soğuk hissini ifade eden ısıl tuşe özelliğinin ortaya koyulması amaçlanmıştır.

Çalışma sonuçları kumaşlarda ısıl soğurganlığın (termal efüzyon) ısıl iletkenlik, lif cinsi ve sıklık, gramaj, kalınlık gibi kumaş yapı parametrelerinden etkilendiğini kanıtlamıştır.

Özellikle kumaşa sıklığın veya gözenek yoğunluğunun bir ifadesi olan ilmek yoğunluğunun düşük olması durumunda gözeneklerde artan hava yoğunluğunun etkisiyle daha düşük ısıl soğurganlık ortaya çıkmıştır. Neticede düşük sıklığa sahip %100 viskon kumaşın daha düşük ısıl soğurganlık değeri ile hayvansal lif içeren viskon kumaşlara göre daha ılık dokunma hissi verdiği, yün ve kaşmir lifleri arasında ise ısıl tuşe açısından fark olmadığı belirlenmiştir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Çalışma kapsamında iplik ve kumaş numunelerinin üretilmesini gerçekleştiren KARAFİBER HOLDİNG'e ve termal testlerin yapılmasında destek veren Liberec Teknik Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Fakültesi'nden Ladislav Nagy'ye teşekkürlerimi sunarım.

#### 6. KAYNAKLAR

1. Mengüç, S.G., 2012. Bazı Özel Hayvansal Liflerden Elde Edilen İpliklerden Üretilen Kumaşların Özellikleri Üzerine Bir Araştırma. İzmir, Bornova: Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 312.
2. Li, Y., 2001. The Science of Clothing Comfort. Textile Progress, 31(1/2), 64-77.
3. Marmaralı, A., Dönmez Kretzschmar, S., Özdil, N., Gülsevin Oğlakçioğlu, N., 2006. Giysilerde Isıl Konforu Etkileyen Parametreler. Tekstil ve Konfeksiyon, 16(4), 241-246.
4. Oglakcioglu, N., Marmaralı, A., 2007. Thermal Comfort Properties of Some Knitted Structures,

- Fibres & Textiles in Eastern Europe, 15(5-6), 64-65.
5. Öner, E., Okur, A., 2010. Materyal, Üretim Teknolojisi ve Kumaş Yapısının Termal Konfora Etkileri. *Tekstil ve Mühendis*, 17(80), 20-29.
  6. Majumdar, A., Mukhopadhyay, S., Yadav, R., 2010. Thermal Properties of Knitted Fabrics Made from Cotton and Regenerated Bamboo Cellulosic Fibres. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(10), 2042-2048.
  7. Bilgi, M., Kalaoglu, F., 2010. The Effects of Special Finishing Processes on the Performance and Comfort of the Military Garments. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 20(4), 343-347.
  8. Ertekin, G., Marmaralı, A., 2011. Yuvarlak Örme Sandviç Kumaşların Isı, Hava ve Su Buharı Transfer Özellikleri. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 21(4), 369-373.
  9. Sampath, M.B., Aruputharaj, A., Senthilkumar, M., Nalankilli, G., 2012. Analysis of Thermal Comfort Characteristics of Moisture Management Finished Knitted Fabrics Made from Different Yarns. *Journal of Industrial Textiles*, 42(1), 19-33.
  10. Gorjanc, D.S., Dimitrovski, K., Bizjak, M., 2012. Thermal and Water Vapour Resistance of the Elastic and Conventional Cotton Fabrics. *Textile Research Journal*, 82(14), 1498-1506.
  11. Uyanık, S., Kaynak, H.K., 2019. Pamuklu Elastan Süprem Kumaşlarda Konfor ve Boncuklanma Özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(1), 13-22.
  12. Üte, T.B., Oğlakçioğlu, N., Çelik, P., Marmaralı, A., Kadoğlu, H., 2008. Doğal Renkli Pamuk/Angora Tavşan Lifi Karışımından Üretilen İpliklerin Özellikleri ve Örme Kumaşların Isıl Konforuna Etkileri Üzerine Bir Araştırma. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 18(3), 191-196.
  13. Üte, T.B., Çelik, P., Kadoğlu, H., Üzümcü, M.B., Ertekin, G., Marmaralı, A., 2018. Farklı Doğal Liflerin İç Giysilerde Kullanımının Konfor Özellikleri Açısından Araştırılması. *Tekstil ve Mühendis*, 25(112), 335-343.
  14. Oglakcioglu, N., Celik, P., Ute, T.B., Marmarali, A., 2009. Thermal Comfort Properties of Angora Rabbit/cotton Fiber Blended Knitted Fabrics. *Textile Research Journal*, 79(10), 888-894.
  15. Mumcu, H.S., Çakır, G., Yayla, O., Gül, F., Tektunalı, S., Nohut, S., 2019. Hayvansal Lifler Kullanılarak Oluşturulan Kumaşların Performans Özelliklerinin İncelenmesi. *Ulusal Çukurova Tekstil Kongresi-UÇTEK'2019 26-27 Eylül 2019, Adana, TÜRKİYE*
  16. [https://tr.esc.wiki/wiki/Thermal\\_inertia](https://tr.esc.wiki/wiki/Thermal_inertia), Erişim tarihi: 02.07.2021.
  17. <https://ctherm.com/products/tx-thermal-effusivity-touch-tester/>, Erişim tarihi: 12.08.2021.
  18. TS EN 14971: 2013. *Tekstil-Örülmuş Kumaşlar-Birim Uzunluk ve Birim Alan Başına Örgü İlmeği Sayısının Tayini*.
  19. TS EN 12127: 1999. *Tekstil-Kumaşlar-Küçük Numuneler Kullanarak Birim Alan Başına Kütleinin Tayini*.
  20. TS 7128 EN ISO 5084: 1998. *Tekstil-Tekstil ve Tekstil Mamullerinin Kalınlık Tayini*.
  21. ASTM D7984-16 Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument.
  22. Mangat, A.E., Hes, L., Bajzik, V., Mazari, A., 2018. Thermal Absorptivity Model of Knitted Rib Fabric and its Experimental Verification. *Autex Research Journal*, 18(1), 20-27.

## Investigation of Sediment Deposition in Dam Reservoirs

Şerife Pınar GÜVEL\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-3175-5938

<sup>1</sup>General Directorate of State Hydraulic Works, 6<sup>th</sup> Regional Directorate, Adana

Geliş tarihi: 26.07.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: GÜVEL, Ş.P., (2021). Investigation of Sediment Deposition in Dam Reservoirs. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 869-878.

### Abstract

The goal of this study is to investigate the water storage capacity changes in Geographic Information System (GIS) environment due to sedimentation in Kozan Dam Reservoir by examining the local map of the reservoir area and the bathymetric measurements in 2014 of the reservoir. Kozan Dam is operational since 1972 and is located in Lower Ceyhan River Basin in Turkey. Reservoir storage capacity loss is estimated by using GIS tools in digital environment and found as %88.7, %7.5 and %6.5 at minimum, normal and maximum operation level of the reservoir respectively. The need for rehabilitation has arisen in Kozan Irrigation Project in time. In terms of efficient use of water, it is necessary to monitor the amount of water stored in Kozan Dam Reservoir which is used as a water resource of the irrigation project in terms of providing expected performance.

**Keywords:** Reservoir sedimentation, Bathymetry, Water resources management

## Baraj Rezervuarlarında Sediment Birikiminin İncelenmesi

### Öz

Bu çalışmanın amacı, Kozan Baraj rezervuarında, rezervuar alanının yerel haritası ve 2014 yılı batimetri ölçümlerini kullanarak, katı madde birikiminden kaynaklanan rezervuar depolama kapasitesi değişimini Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ortamında araştırmaktır. Kozan Barajı 1972'den beri işletme aşamasındadır ve Türkiye'de Aşağı Ceyhan Nehir Havzasında yer almaktadır. Rezervuar depolama kapasitesi kaybı, sayısal ortamda CBS araçları kullanılarak tahmin edilmiş ve rezervuarın minimum, normal ve maksimum işletme seviyelerinde sırasıyla %88,7, %7,5 ve %6,5 olarak bulunmuştur. Kozan Sulama Projesinde zamanla rehabilitasyon ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Suyun verimli kullanılması ve beklenen performansın sağlanması açısından, sulama projesinin su kaynağı olarak kullanılan Kozan Barajı'nda depolanan su miktarının izlenmesi gerekmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Rezervuarda sediment birikimi, Batimetri, Su kaynakları yönetimi

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Şerife Pınar GÜVEL, [spinar.guvel@dsi.gov.tr](mailto:spinar.guvel@dsi.gov.tr)

## 1. INTRODUCTION

Bathymetric surveys are conducted to detect changes in bottom topography of oceans, reservoirs, lakes, rivers and coastal areas [1-7]. The accuracy of underwater topography measurements is important for constructing harbour and coastal structures, transportation in rivers and evaluation of monitoring activities in reservoirs and lakes. Bathymetric maps are prepared by making measurements depending on the depth in order to determine the underwater topography. There are various methods that are used in bathymetry survey such as classical methods, acoustic sonar measurement methods [8], satellite-derived remote sensing techniques [9-13], survey techniques using unmanned aerial vehicles [14] and unmanned surface vehicles [15]. Nowadays, traditional methods are replaced by easy to use, labour and cost saving methods using advanced devices.

The quantity and quality of water resources are important in terms of benefiting from water resources for various purposes such as irrigation, energy, water supply, or flood control. Meteorological, environmental and human impacts in the scope of the effects on water management strategies are examined in the search of solutions to the problems caused. In this context, the changes of the water volume stored in reservoirs of dams that are constructed on rivers are regularly monitored. In the literature, it is seen that GIS is used in many research studies on the issues such as irrigation [16-17], flood analysis [18-19], water quality [20], groundwater [21-22], environmental management, monitoring and evaluation works of water-related parameters. In recent years, research studies on one or more of the issues on reservoir bathymetry survey methods, sediment transport, sediment yield and reservoir sedimentation have been seen in the literature [8,23-36]. Dadoria and Tiwari (2016) presented a review study in the field of sedimentation based on review of detailed study of various researchers [37]. Adongo et al. (2019) generated bathymetric TIN maps of 9 reservoirs in Ghana interpolating depth points by using GIS

tools for investigating reservoir sedimentation [38]. Darama et al. (2019) analysed bathymetric data of Hasanlar Dam Reservoir in GIS environment with the aim of investigation of reservoir sedimentation [39]. Güvel and Yurtal (2020) investigated the changes in sediment accumulation in Seyhan Dam Reservoir by using historical hydrographic measurements [40].

In this study, it is aimed to investigate the effects of sedimentation in Kozan Dam Reservoir on water resources management studies by using bathymetric-based data of the year 2014 in comparison with local topography map of the reservoir area before the dam constructed.

## 2. STUDY AREA

Kozan Dam reservoir area is selected as the study area to investigate sediment threat on Kozan Dam reservoir and sedimentation effects on operation works of the dam. Kozan Dam was constructed in the north of Kozan in Adana in the Lower Ceyhan River Basin. The main stream branch of the dam is Kilgen River and its tributary branches are Kirksuyu Stream and Dalacak Stream. Kozan Dam characteristics are given in Table 1 and the location of Kozan Dam is shown in Figure 1.

**Table 1.** Kozan Dam characteristics

Characteristics	Data
River Basin	Ceyhan
River	Kilgen
Type	Rock fill
Date put into operation	1972
Purpose	Irrigation

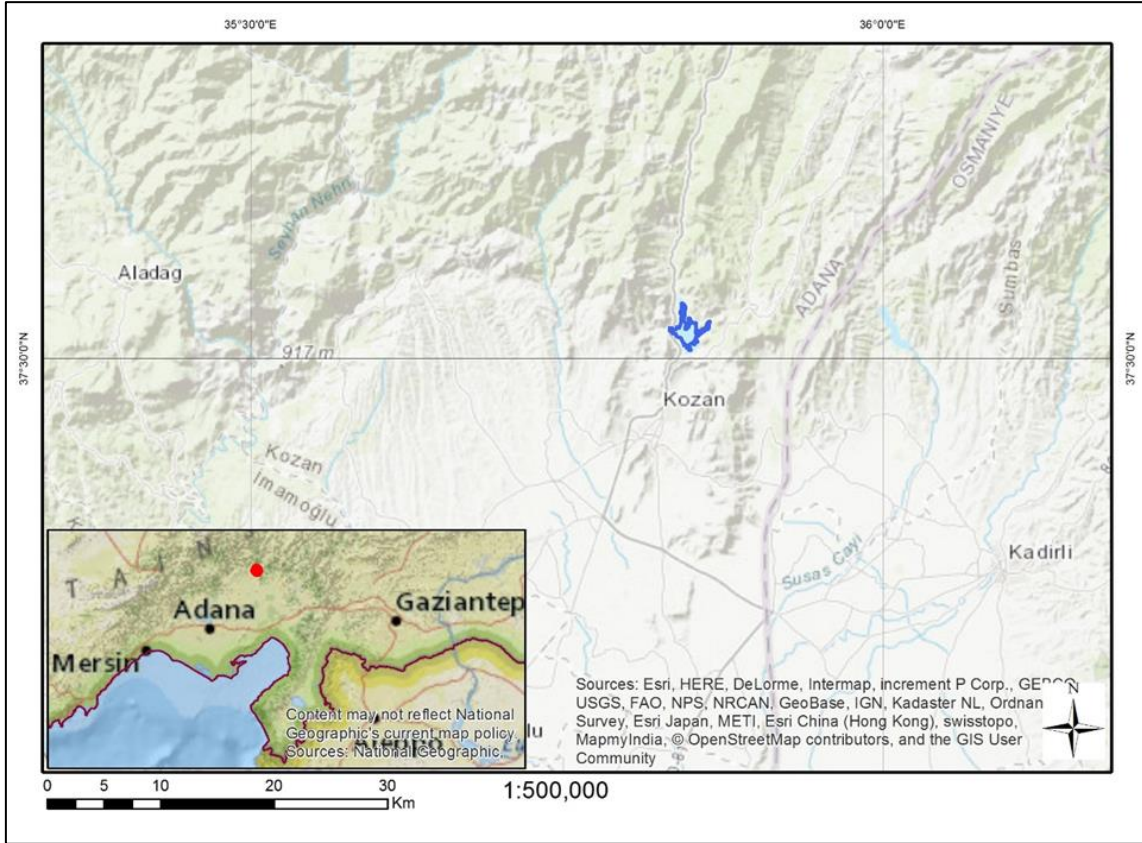
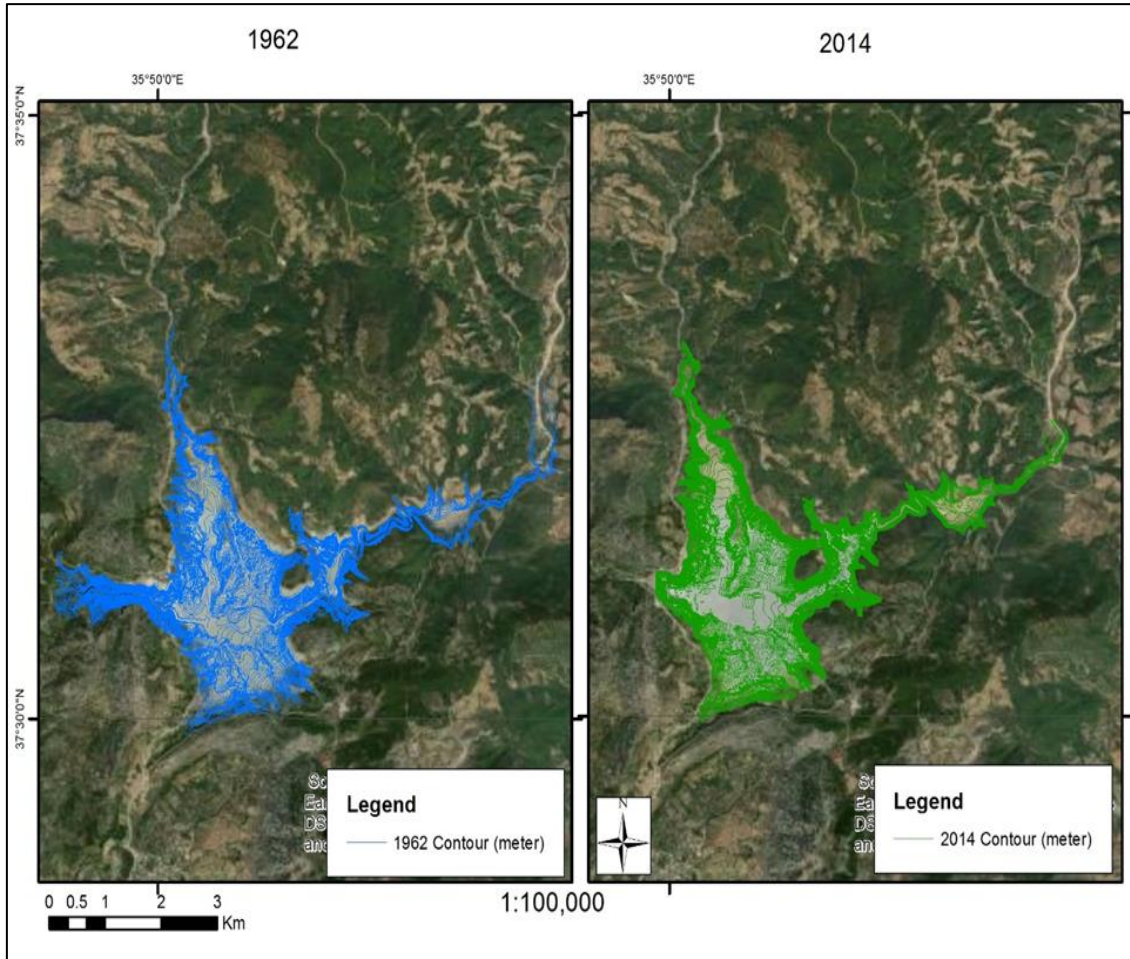


Figure 1. The location of Kozan Dam in Turkey

### 3. MATERIAL AND METHOD

The topographic maps of the Kozan Dam reservoir area prepared in 1962 and the bathymetric map of Kozan Dam reservoir prepared in 2014 were obtained from DSI archive. The topographic maps were created by using aero photogrammetry method. In order to digitize the maps obtaining the reservoir area topography prepared in 1962, the maps have been scanned and transferred into GIS environment with referenced coordinates, the elevation information on the maps has been added to attribute table with integrating location information. Digitized map of the reservoir area before the construction of Kozan Dam is given in Figure 2(a). Survey data of bathymetric measurements of Kozan Dam reservoir in 2014 was carried out by photogrammetric method on the

land side and by using echo-sounder on the water side, the hydrographic map of the reservoir was produced integrating both land side data and water side data. Depth and location information of bathymetric survey is integrated in the database using tools of required software in preparing of hydrographic maps, measured values can be extracted to CAD/GIS software to create 3D models and to assess outputs of geographic analysis. Bathymetric map of 2014 in NCZ format in GIS environment is given in Figure 2(b). In this study, ArcGIS software was used to create and evaluate digital models of the reservoir. Analysis of the topography map versus the bathymetric map, and creating digital surfaces were carried out by using GIS. ArcGIS software was used to create 3D models of Kozan Dam reservoir and sediment thickness map of the reservoir.



**Figure 2.** (a) The digitized map of the reservoir area before the construction of Kozan Dam, (b) The image of Kozan Dam reservoir bathymetric survey data of 2014

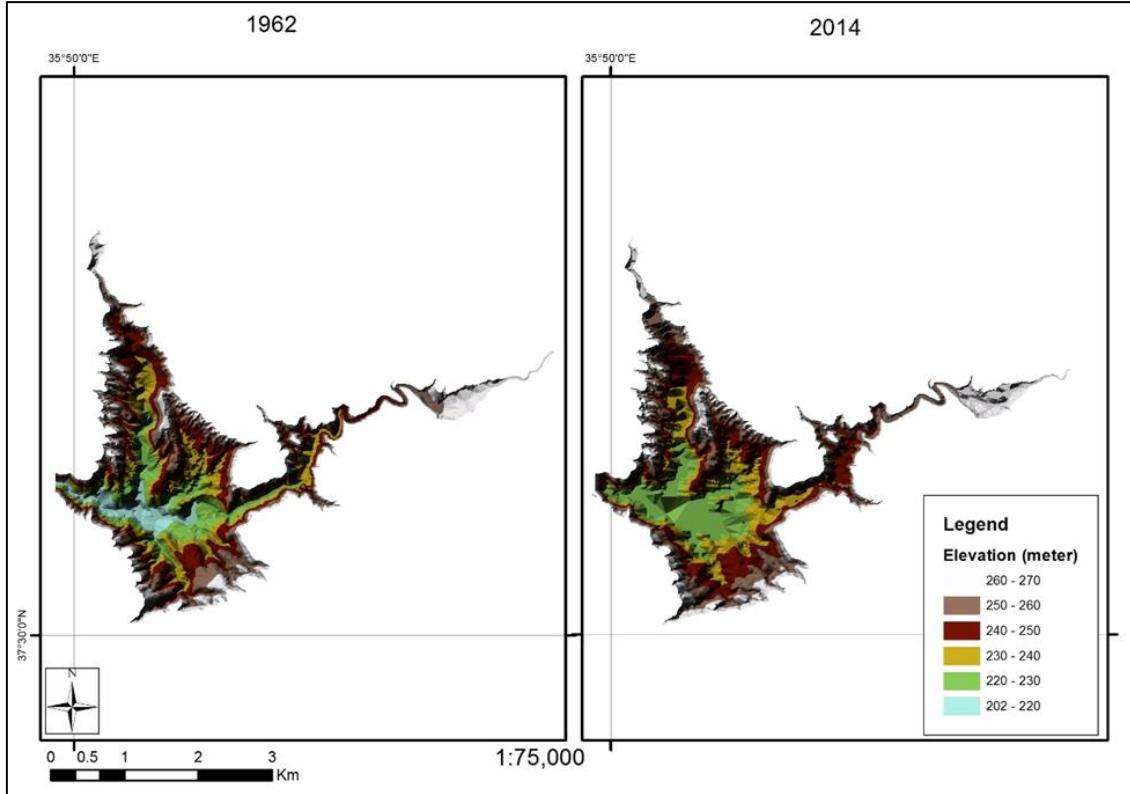
#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

The map of 1962 of the dam site and the reservoir area was digitized by using ArcGIS; TIN (Triangular Irregular Network) interpolation method was used to create digital model of the dam site and the reservoir area before dam construction which is shown in Figure 3 (a). Reservoir bathymetric survey data of 2014 was used to create 3D model of Kozan Dam reservoir of 2014 which is shown in Figure 3(b). Reservoir storage capacity at certain water levels were calculated based on both two 3D

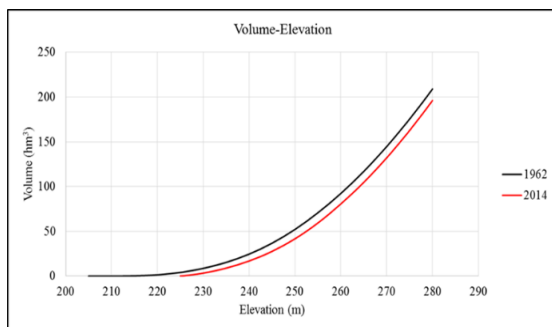
models by using GIS tools. Volume-elevation chart for two models were prepared to compare the water volumes at certain levels. The capacity loss between years provides the information about sedimentation amount.

Volume-elevation curve of the Kozan Dam reservoir is seen in Figure 4. Reservoir storage capacity loss of the Kozan Dam reservoir at minimum, normal and maximum operation level of the reservoir is estimated as %88,7, %7,5 and %6,5 respectively by using GIS analysis tools.





**Figure 3.** (a) 3D model of the reservoir area before the construction of Kozan Dam in 1962, (b) 3D model of Kozan Dam reservoir in 2014



**Figure 4.** Volume-elevation curve of the Kozan Dam reservoir

The sub-basin area of Kırksuyu Stream is approximately 4.8 times larger than the area of the sub-basin of Dalacak Stream, therefore it has been evaluated that the main source of sediment coming to Kozan dam reservoir is Kırksuyu Stream sub-basin.

Sediment thickness map of Kozan Dam Reservoir was obtained by comparing the dimensional models of 1962 and 2014 in GIS environment (Figure 5). The sediment thickness in front of the dam body in the reservoir area is up to 18 meters. The storage volume loss of %88.7 in dead volume capacity; the analysis and calculation of the revised storage volume of the reservoir compared to the previous condition indicates the necessity of the revision on operation-maintenance works depending on not only water volume changes but also the possibility of usability of water intake structure of the dam body.

As seen in Figure 5, the bottom elevation of the reservoir has been assessed to be decreased due to erosion underwater on the left side of the dam reservoir close to thalweg. Sediment accumulation between 0-5 m and underwater erosion between -5-0 m are seen in the central parts of the reservoir

by examining the sediment thickness map between 2014 and 1962. It is seen that in the upstream erosion occurred along the shoreline and there is sediment accumulation in the middle parts.

Sediment accumulation in the area close to the dam body has risen up to 15 meters by 2014. There is no available data on erosion in the reservoir.

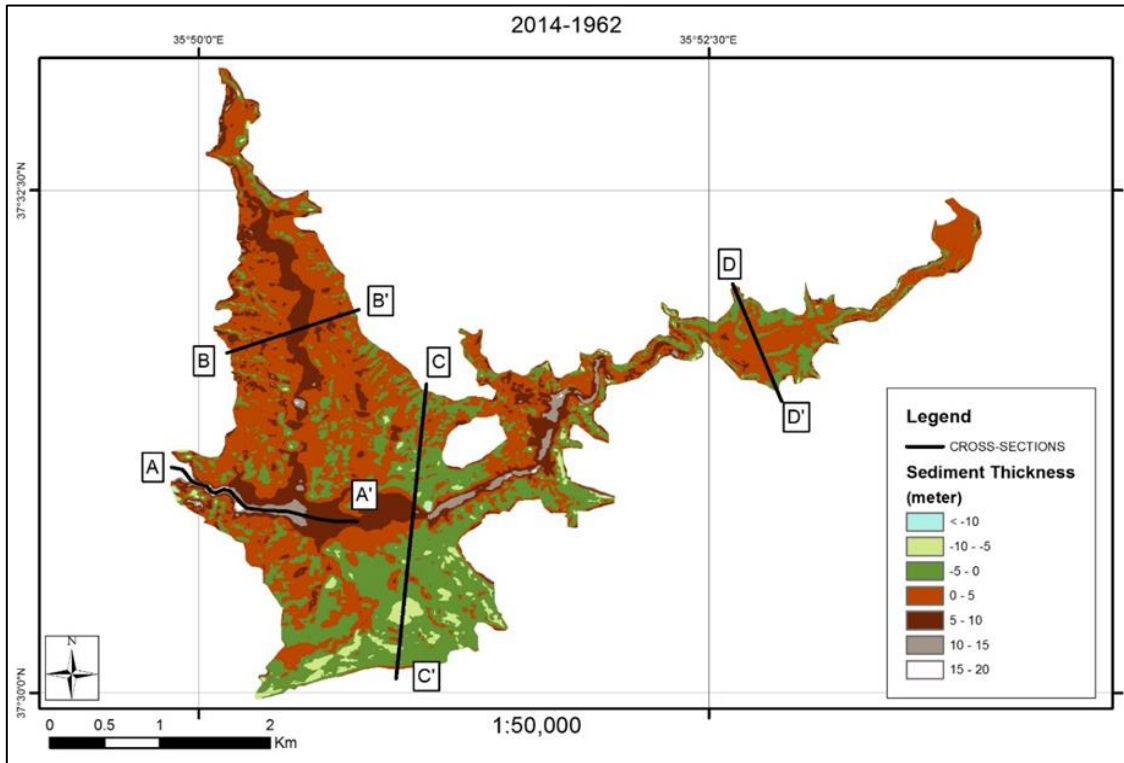


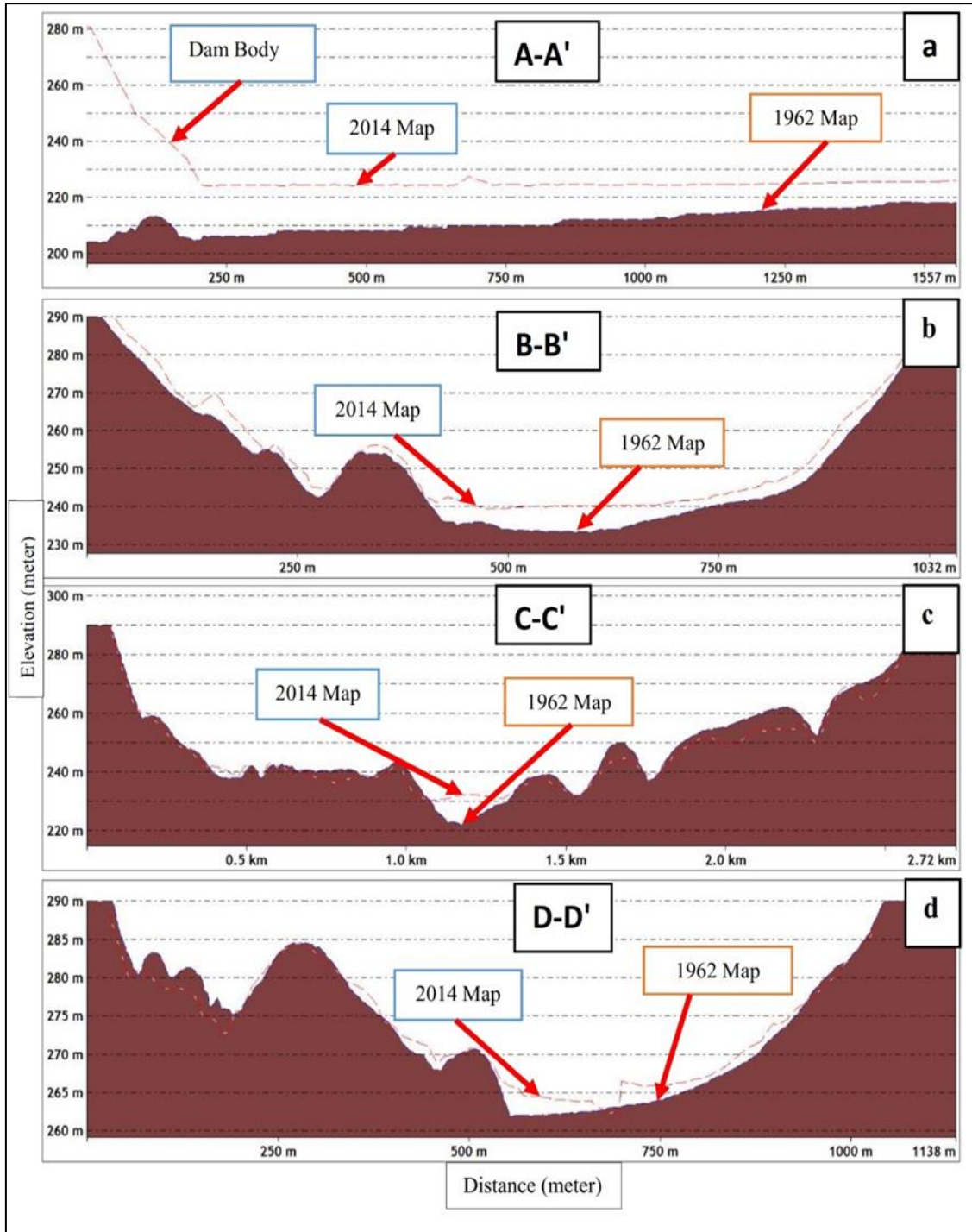
Figure 5. Sediment thickness map of Kozan Dam Reservoir between 2014 and 1962

The cross-sections in the reservoir shows the sediment accumulation and the elevation changes between 2014 and 1962 (Figure 6). It is seen that minimum ground topography elevation in front of the dam body is 224 meters in 2014 as seen in the cross-section A-A' in Figure 6.a, so the operation works of the dam has to be revised upon revised volume-elevation-area chart. The cross-section B-B' shows the elevation changes caused by transported sediment from sub-basin of Dalacak Stream which is the tributary of Kilgen River. Sediment accumulation in B-B' cross-section (Figure 6.b) is between 0-10 meters. Erosion effect on the shoreline of the reservoir is seen at the cross-section C-C' (Figure 6.c), there's no available historical data records about the main causes of erosion on this side. Sediment

accumulation is also seen on this cross-section. The cross-section D-D' (Figure 6.d) shows the elevation changes caused by coastal erosion in the upstream.

Irrigation rehabilitation studies are carried out in order to use water efficiently in cases where the amount of water required for irrigation is insufficient in irrigation projects or inadequate efficiency from irrigation facilities. Kozan Dam reservoir is the water resource of Kozan Irrigation Project. The storage volume capacity of Kozan Dam Reservoir and sedimentation impacts on the dam body and the reservoir have to be monitored regularly because of its effect on the operation works of the irrigation project.





**Figure 6.** The sediment accumulation on sample cross sections in Kozan Dam Reservoir between 2014 and 1962

## 5. CONCLUSION

Bathymetric surveys are carried out to map details of ground topography in lakes, reservoirs and oceans; integrated hardware and software technology with high capacity is essential to provide high resolution bathymetry data. The areal sizes of reservoirs, climate factors and topography of coastline of reservoirs are needed to be taken into account in determining period and cost of bathymetric surveys.

Sediment thickness map of Kozan Dam Reservoir was prepared in GIS environment, then spatial and temporal changes of sediment accumulation up to 2014 in Kozan Dam Reservoir was estimated.

Reservoir storage capacity is calculated by using 3D models in GIS environment and storage capacity loss is estimated as %88.7, %7.5 and %6.5 at minimum, normal and maximum operation level of the reservoir respectively.

The analysis results of this study obtained by using GIS tools will contribute future works on investigation of sedimentation impacts on operation works of the dam. The results will also contribute next researches based on new bathymetric survey data in the future.

## 6. REFERENCES

1. Cross, B.K., Moore, B.C., 2014. Lake and Reservoir Volume: Hydroacoustic Survey Resolution and Accuracy. *Lake and Reservoir Management*, 30(4), 405-411. DOI: 10.1080/10402381.2014.960115.
2. Popielarczyk, D., Templin, T., 2014. Application of Integrated GNSS/Hydroacoustic Measurements and GIS Geodatabase Models for Bottom Analysis of Lake Hancza: the Deepest Inland Reservoir in Poland. *Pure Appl. Geophys*, 171, 997–1011.
3. Borowiak, D., Nowiński, K., Grabowska, K., 2016. A New Bathymetric Survey of the Suwałki Landscape Park Lakes, *Limnol. Rev.* 16(4), 185–197.
4. Olushola, S.O., Ehigiator-Irughe, R., 2017. Bathymetric and Volumetric Analysis of Jebba (Hydropower) Dam Harnessing its Capability for Multipurpose Use. *Nigerian Journal of Environmental Sciences and Technology (NIJEST)*, 1(1), 111-122.
5. Maxim, A., Adrian, R., Alina-Florina, N., Lucian, G.P., Daniel-Eduard, C., 2017. Comparison of Models and Volumetric Determination for Catusa Lake, Galati. *TEHNOMUS-New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies*, 67-71.
6. Muchanga, M., Sichingabula, H.M., Obando, J., Chomba, I., Sikazwe, H., Chisola, M., 2019. Bathymetry of the Makoye Reservoir and its Implications on Water Security for Livestock Within the Catchment. *International Journal of Geography and Geology*, 8(3), 93-109.
7. Parente, C., Vallario, A., 2019. Interpolation of Single Beam Echo Sounder Data for 3D Bathymetric Model. *(IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10(10), 6-13.
8. Stoleriu, C.C., Romanescu, G., Mihu-Pintilie, A., 2019. Using Single-beam Echo-sounder for Assessing the Silting Rate from the Largest Cross-border Reservoir of the Eastern Europe: Stanca-costesti Lake, Romania and Republic of Moldova. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, February 2019, 14(1), 83-94.
9. Jagalingam, P., Akshaya, B.J., Hegde, A.V., 2015. Bathymetry Mapping Using Landsat 8 Satellite Imagery. 8<sup>th</sup> International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2015). *Procedia Engineering*, 116, 560-566.
10. Manessa, M.D.M., Haidar, M., Hastuti, M., Kresnawati, D.K., 2017. Determination of the Best Methodology for Bathymetry Mapping Using Spot 6 Imagery: A Study of 12 Empirical Algorithms. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 14(2), 127-136.
11. Pushparaj, J., Hegde, A.V., 2017. Estimation of Bathymetry Along the Coast of Mangaluru using Landsat-8 Imagery. *The International Journal of Ocean and Climate Systems*, 8(2), 71-83.

12. Akgül, M.A., Dağdeviren, M., Biroğlu, İ., 2018. Satellite-derived Bathymetry Using Multi-temporal Satellite Images. DSİ Technical Bulletin, 127, 14-27 (in Turkish).
13. Duplančić Leder, T., Leder, N., 2020. Optimal Conditions for Satellite Derived Bathymetry (SDB) Case Study of the Adriatic Sea. FIG Working Week 2020, Smart Surveyors for Land and Water Management, Amsterdam, the Netherlands, 10-14 May 2020.
14. Rossi, L., Mammi, I., Pelliccia, F., 2020. UAV-Derived Multispectral Bathymetry. Remote Sensing, 12(23), 3897; doi:10.3390/rs12233897.
15. Suhari, K. T., Karim, H., Gunawan, P. H., and Purwanto, H., 2017. Small ROV Marine Boat for Bathymetry Surveys of Shallow Waters-Potential Implementation in Malaysia. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-4/W5, 201–208, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W5-201-2017>, 2017.
16. Acharya, S., Pandey, A., Mishra, S.K., Chaube, U.C., 2016. GIS Based Graphical User Interface for Irrigation Management. Water Science & Technology: Water Supply, 16(6), 1536–1551.
17. Negi, S., Arya, A., Kathota, J.C., Patel, A.N., Singh, V., Garg, J.K., Kalubarme, M.H., 2019. Analysis of Impact of Canal Irrigation on Waterlogged Areas and Environment Using Geo-informatics Technology in Gujarat State, INDIA, International Journal of Environment and Geoinformatics (IJECEO), 6(2), 172-185. DOI: 10.30897/ijegeo.541714.
18. Akinbobola, A., Okogbue, E.C., Olajire, O.O., 2015. A GIS-based Flood Risk Mapping Along The Niger-Benue River Basin in Nigeria Using Watershed Approach. Ethiopian Journal of Environmental Studies & Management, 8(6), 616-627.
19. Dang, A.T.N., Kumar, L., 2017. Application of Remote Sensing and GIS-based Hydrological Modelling for Flood Risk Analysis: a Case Study of District 8, Ho Chi Minh City, Vietnam. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8(2), 1792-1811, DOI: 10.1080/19475705.2017.1388853.
20. Akgül, M.A., Dağdeviren, M., Ekmekçi, F., Kağnıcıoğlu, N., 2019. Estimation of Water Quality Parameters in Lake Köyceğiz Using Remote Sensing. 10. Ulusal Hidroloji Kongresi, 9-12 Ekim 2019 (in Turkish).
21. Augusto Filho, O., Soares, W., Fernández, C.I., 2016. Mapping of the Water Table Levels of Unconfined Aquifers Using Two Interpolation Methods. Journal of Geographic Information System, 8, 480-494.
22. Kisaka, M., Mato, R., 2018. Spatial Variation of Ground water Quality Parameters and its Suitability for Drinking at Makutopora Aquifer, Dodoma Municipality, Tanzania. International Journal of Environment and Geoinformatics (IJECEO). 5(3):337-.352. DOI: 10.30897/ijegeo.462691.
23. Jolly, J.P., 1982. A Proposed Method for Accurately Calculating Sediment Yields from Reservoir Deposition Volumes, Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield (Proceedings of the Exeter Symposium, July 1982), IAHS Publ.no.137.
24. White, W.R., 1990. Reservoir Sedimentation and Flushing. Hydrology in Mountainous Regions, II-Artificial Reservoirs; Water and Slopes (Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990). IAHS Publ. 194, 129-139.
25. Taruya, H., Fuji, H., 1997. Current Conditions of Reservoir Sedimentation in Irrigation Dams in Japan. JARQ, 31(1), 29-34.
26. Magnuszewski, A., Moran, S., Yu, G., 2010. Modelling Lowland Reservoir Sedimentation Conditions and the Potential Environmental Consequences of Dam Removal: Wloclawek Reservoir, Vistula River, Poland, Sediment Dynamics for a Changing Future (Proceedings of the ICCE Symposium Held at Warsaw University of Life Sciences-SGGW, Poland, 14-18 June 2010). IAHS Publ. 337.
27. Munthali, K.G., Irvine, B.J., Murayama, Y., 2011. Reservoir Sedimentation and Flood Control: Using a Geographical Information System to Estimate Sediment Yield of the Songwe River Watershed in Malawi. Sustainability 2011, 3(1), 254-269; doi:10.3390/su3010254.

28. Onwuegbunam, D.O., M.A. Oyebode, Onwuegbunam N.E., Maikano S., Waziri C.H., 2013. Sedimentation Assessment of a Small Reservoir at Afaka Forest Reserve, Kaduna, Nigeria. *Journal of Environment and Earth Science*, ISSN 2224-3216 (Paper) ISSN 2225-0948 (Online), 3(9) 183-190.
29. Schleiss, A.J., Franca, M.J., Juez, C., De Cesare, G., 2016. Reservoir Sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 595-614. DOI: 10.1080/00221686.2016.1225320.
30. Shendge, R.B., Chockalingam, M.P., 2016. Review of Reservoir Sedimentation, Remote Sensing and GIS Technology. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology (IJERT)*, 3(6), 45-51.
31. Jansen, L., Sidek, L.M., Jajarmizadeh, M., 2016. Impact of Sedimentation Hazard at Jor Reservoir, Batang Padang Hydroelectric Scheme in Malaysia. *International Conference on Advances in Renewable Energy and Technologies (ICARET2016)*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 32, 012030.
32. Maloi, S.K., Sang, J.K., Raude, J.M., Mutwiwa, U.N., Mati, B.M., Maina, C.W., 2016. Assessment of Sedimentation Status of Ruiru Reservoir, Central Kenya, *American Journal of Water Resources*, 4(4), 77-82. doi: 10.12691/ajwr-4-4-1.
33. Obialor, C.A., Okeke, O.C., Onunkwo, A.A., Fagorite, V.I., Ehujoo, N.N., 2019. Reservoir Sedimentation: Causes, Effects and Mitigation. *International Journal of Advanced Academic Research, Sciences, Technology and Engineering*, 5(10), 92-109.
34. Lucian, C.D., Mihai-Pintilie, A., Elena, P.L., Stoleriu, C.C., 2019. 50 Year's Determination of Reservoir Sedimentation Rate Using Topography Measurements and GIS. Case Study: Strîmtori-Firiza Reservoir, Baia Mare, Romania. *International Scientific Conference Geobalcanica 2019*, 591-596, DOI: 10.18509/GBP.2019.69.
35. Výleta, R., Valent, P., Danáčová, Z., 2020. Monitoring Changes in the Morphology and Storage of a Small Water Reservoir: A Case Study from Vrbovce, Slovakia. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 28(2), 30-35.
36. Uzor-Totty, A.E., Oyegun, C.U., 2020. Spatio-temporal Dynamics of Sediment Yield Across the Imo River Basin SE Nigeria. *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJECEO)*, 7(2), 184-190. DOI: 10.30897/ijegeo.645611.
37. Dadoria, D., Tiwari, H.L., 2016. Assessment of Sedimentation by GIS-A Review. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, ISSN: 2321-0869 (O) 2454-4698 (P), 5(3), 124-128.
38. Adongo, T.A., Kyei-Baffour, N., Abagale, F.K., Agyare, W.A., 2019. Assessment of Reservoir Sedimentation of Irrigation Dams in Northern Ghana. *Lake and Reservoir Management*, 36, 87-105. DOI: 10.1080/10402381.2019.1659461
39. Darama, Y., Selek, Z., Selek, B., Akgül, M.A., Dağdeviren, M., 2019. Determination of Sediment Deposition of Hasanlar Dam Using Bathymetric and Remote Sensing Studies. *Natural Hazards*, 97, 211-227, DOI: 10.1007/s11069-019-03635-y.
40. Güvel, Ş.P., Yurtal, R., 2020. Investigation of Sedimentation Effects on Seyhan Dam Reservoir, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 35(2) 1015-1025.

## Pamuk Çiğidi Küspesi ve Kırmızı Biber İşleme Atıklarından Biyoyakıt Amaçlı Pelet Elde Edilmesi

Ülkü Fidan BAŞIBÜYÜK<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-8869-7329  
Ali AYBEK<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-3036-8204  
Serdar ÜÇOK<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0002-7158-669X

<sup>1</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü,  
Kahramanmaraş

Geliş tarihi: 19.02.2021 Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: BAŞIBÜYÜK, Ü.F., AYBEK, A., ÜÇOK, S., (2021). Pamuk Çiğidi Küspesi ve Kırmızı Biber İşleme Atıklarından Biyoyakıt Amaçlı Pelet Elde Edilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 879-890.

### Öz

Bu çalışmada, tekstil fabrikalarından alınan pamuk çiğidi küspesi (PÇK) ile biber fabrikalarından alınan kırmızı biber işleme atıklarından (KB) enerji üretim amaçlı pelet elde edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen peletlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile beraber peletlerin mekanik özellikleri, ısı ve yanma özellikleri belirlenmiştir. Materyaller partikül boyutuna getirilip farklı oranlarda 5 farklı karışım (%100 PÇK, %75 PÇK+%25 KB, %50 PÇK+%50 KB, %25 PÇK+%75 KB ve %100 KB) oluşturulmuştur. Karışımlar 6 kW motor gücüne sahip olan ve işleme kapasitesi 70-90 kg/h olan, dairesel sıralı delikli düz kalıplı laboratuvar tipi bir peletleme makinesi kullanılarak peletlenmiştir. Peletlerin kalitesi ile ilgili olarak pelet parça yoğunluğu 994,06-1177,51 kg/m<sup>3</sup>, dikey basma gerilme direnci 165,01-319,82 N, nem alma oranı %20,06-23,25 ve kırılma direnci %99,04-99,71 değerleri arasında bulunmuştur. Peletlerin diğer özellikleri ise kül içeriği %14,38-%19,99, nem içeriği %6,58-%9,59, sabit karbon oranı %13,57-%21,27, uçucu madde içeriği ise %54,74-%61,86, toplam azot oranı %3,80-%5,56, toplam karbon oranı %38,15-%41,71, üst ısı değeri 13,01-%15,18 MJ/kg aralığında belirlenmiştir. %100 PÇK'den üretilen peletler; termogravimetrik analizler, nem alma oranı hesaplamaları ve dikey sıkıştırma analizi hesaplamaları neticesinde en iyi biyoyakıt olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak kırmızı biber işleme atıkları ve pamuk çiğidi küspesinden enerji amaçlı pelet üretimi yapılabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Biyokütle, Biyoyakıt, Pamuk çiğidi küspesi, Kırmızı biber işleme atıkları, Peletleme

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Serdar ÜÇOK, [sucok@ksu.edu.tr](mailto:sucok@ksu.edu.tr)

## **Pellet Production for Biofuel from Cotton Cake and Red Pepper Processing Wastes**

### **Abstract**

In this study, aimed to obtain pellets for energy production from cotton seed meal (CCP) from textile factories and red pepper processing wastes (RPPW) from pepper factories and Diameter, length, weight, pellet particle density, fracture resistance, vertical compression resistance, moisture uptake resistance, moisture content, ash content, volatile matter amounts, and thermogravimetric analysis were determined. There resulting mixtures are 100% CCP, 75% CCP +25% RPPW, 50% CCP +50% RPPW, 25% CCP +75% RPPW and 100% RPPW. The mixes obtained were pelleted using a circular row perforated flat die laboratory pelletizing machine with a 6 kW motor power and a processing capacity of 70-90 kg/h. Regarding the quality of the pellets, the pellet particle density was 994.06-1177.51 kg/m<sup>3</sup>, the vertical compression strength was 165.01-319.82 N, the moisture uptake resistance was 20.06-23.25% and the fracture resistance was between 99.04-99.71%. Ash content of pellets was 14.38%-19.99%, moisture content was 6.58%-9.59%, fixed carbon rate was 13.57%-21.27%, volatile matter content was 54.74%-61.86%, total nitrogen content was 3.80% -5.56%, total carbon was 38.15%-41.71% and its higher heating value was 13.01%-15.18 MJ/kg. Pellets produced from 100% PÇK was determined as the best biofuel as a result of thermogravimetric analysis, dehumidification rate calculations and vertical compression analysis calculations As a result, red pepper processing waste and cotton seed meal are suitable materials for energy pellet production.

**Keywords:** Biomass, Biofuel, Cotton seed meal, Red pepper processing waste, Pelleting

### **1. GİRİŞ**

Dünyadaki nüfus artışı ve teknolojinin gelişimi neticesinde enerjiye olan gereksinim günden güne artmaktadır. Gelişmekte olan ve gelişmiş ülkelerde gerekli enerji ihtiyacının karşılanması için fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Dünyada enerjiye olan ihtiyaç her yıl %5 oranında artmaktadır. Bu artış neticesinde fosil kaynaklı yakıtların miktarı da gün geçtikçe büyük oranda azalmaktadır. Bu durum yeni enerji kaynakları arayışlarını ortaya çıkarmıştır. Bu anlamda mevcut enerji kaynaklarına ek olarak son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına, özellikle biyokütle kaynaklarından enerji üretimi ile bu soruna alternatif çözümler aranmaktadır [1]. Biyokütle enerjisi, çevre ile dost sürdürülebilir enerji üretimini ve çevre yönetimini sağlayan, kalkınmayı hedefleyen özellikleri ile tüm dünyada geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bu bakımdan Türkiye'de de biyokütlenin, enerji üretiminde değerlendirilmesi konusu önem kazanmıştır [2]. Biyokütlenin kullanılması ile üretilen enerjinin kalkınmaya yardımcı olması ve Kyoto protokolünün amaçları ile uyumu açısından oldukça önemlidir [3].

Biyokütlenin kullanılabilmesi için teknolojik sorunların giderilmesi gerekmektedir [4]. Tarımsal atıkların yüksek nem içeriğine sahip olmaları ve yoğunluklarının düşük olmaları nedeniyle evlerde ve endüstriyel alanlarda hiçbir işlem görmeden direkt olarak kullanılması hem çok etkili olmamakta hem de taşıma, depolama gibi aşamalarında ekonomik olmamaktadır. Bu sorunlar biyokütlenin peletlenmesi ile daha aza indirgenmektedir. Peletleme; dağınık halde olan biyokütlenin yüksek basınçla sıkıştırılarak taşıma ve depolama açısından daha kolay olan ve çevre dostu biyokütleyle çevrilmesine denilmektedir [5].

Türkiye'de hem artan enerji ithal yükünün azaltılması, hem de enerji ve çevre sorununa sürdürülebilirlik ilkesi ile yaklaşılması açısından, önemli bir potansiyeli bulunan yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması önemlidir. Tarım ve tarıma dayalı sanayide önemli düzeyde biyokütle materyalleri mevcuttur. Bu materyaller biyoyakıt amaçlı pelet elde edilmesi için kullanılabilir. Materyallerin peletlenmesi ile hacimsel ısı değeri artar, taşıma ve depolama maliyetleri azalır, ısı özellikleri iyileşir, atmosfere salınan parçacık emisyonları azalır ve aynı

boyut/şekilde daha üstün özelliklere sahip bir biyoyakıt elde edilebilir. Bitkisel atıklardan enerji üretmek amacıyla etkin ve kolay bir şekilde kullanabilmek için uygulanacak yöntemlerden birisi de bu atıkların kurutulup, öğütüldükten sonra preslenerek pelet haline getirilmesidir [6].

Günümüzde Türkiye’de bazı sanayilerde tarımsal ve fabrika atıklarından büyük ölçekte yararlanılamamaktadır. Türkiye’de biyokütle enerjisi kullanımının önündeki ekonomik engeller ile politika ve piyasa araçlarının yetersizliği gibi nedenler sonucunda biyokütle ve katı atık işleyen enerji tesislerinde özel sektör henüz yeterli düzeyde ilgi duymamaktadır. Tarımsal üretim neticesinde geriye kalan bitkisel artıkların herhangi bir yöntemle değerlendirilmeyip yok edilmesi ciddi düzeyde çevre kirliliğini beraberinde getirmekte ve ekonomik bir kayıp oluşturmaktadır. Ortaya çıkan çevre kirliliğinin ve ekonomik kayıpların önüne geçebilmek için atık sorunlarında peletleme yöntemi uygun bir yöntemdir [7].

Tarımsal ve tarıma dayalı sanayi atıkları, özellikle gelişmekte olan ülkelerde enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Birçok gelişmiş ülkede katı atıklar, biyokütlenin peletlenmesi işlemi ile yararlı, kullanılabilir ve ekonomik ürünlere dönüştürülmektedir [8].

Peletleme yöntemi, dağınık haldeki biyokütlenin kurutulup öğütülmesinin ardından yüksek basınçta sıkıştırılması ile yapılmaktadır. Pelet üretiminde odun talaşı, zeytin küspesi, mısır koçanı, kırmızıbiber işleme atıkları, kiraz çekirdeği, pamuk çiğdi küspesi gibi atıklar kullanılabilir. Elde edilen peletler, hacimsel olarak üretiminde kullanılan organik atıklardan daha az yer kaplamaktadır. Nem içeriği daha az olduğu için daha uzun süre depolanabilmekte ve daha fazla ısı açığa çıkarmaktadır. Bununla birlikte fosil kaynaklı yakıtlara göre daha ucuzdur. Üretilen peletlerin dayanıklılığının yüksek olması ve kullanıcıya sağlam bir şekilde ulaşması oldukça önemlidir. Dayanıklılığı yüksek olan peletlerin taşınması ve depolanması daha kolay olmaktadır [9].

Kahramanmaraş yöresi kırmızıbiber ve pamuk üretimi ile tanınan bir bölgedir. Kırmızıbiber işleme atıkları ile pamuk çiğdi küspesi kullanılarak enerji amaçlı pelet üretilmesi, yöreye, ülkeye ekonomik ve çevresel korunma açısından önemli katkılar sağlayabilecektir.

Bu çalışmanın temel amacı pamuk çiğdi küspesi ve kırmızıbiber işleme atıklarından biyoyakıt amaçlı pelet elde edilmesidir.

Spesifik amaçları ise;

- Peletlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini (Nem, uçucu madde, sabit karbon, C, H, N, kül, üst ısı) belirlemek,
- Peletlerin mekanik özelliklerini (dayanıklılık, kırılma direnci, sıkıştırma direnci, nem alma direnci) belirlemek,
- Peletlerin yanma karakteristiklerini belirlemektir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yılmaz (2014), bazı tarımsal atıkların peletlenmesi ve pelet fiziksel özelliklerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmada pamuk ve susam saplarının peletlenmesi işlemi amaçlanmıştır. Çalışmada, üç farklı nem içeriğine sahip olan kurutulup öğütülmüş haldeki pamuk ve susam sapları kullanılmıştır. Peletlerin sıkıştırma direnci, dayanıklılık direnci, gerilme direnci, kırılma direnci ve nem alma direnci belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, elde edilen silindirik peletlerin çap aralığının 8,1 mm ile 8,97 mm arasında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca peletlerin nem içeriğinin arttıkça yoğunluklarının da arttığı belirlenmiş olup, hacim yoğunluğunun 430-717 kg/m<sup>3</sup>, parça yoğunluğunun ise 922-1368 kg/m<sup>3</sup> değiştiği belirlenmiştir. Peletlerin, fiziksel testler sonucunda oldukça dayanıklı bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir [10].

Gürdil ve arkadaşları (2016), yaptıkları çalışmada fındık zurufu atığını peletlemişlerdir. Fındık zurufu atıklarının öğütme inceliği 6 mm ve nem içeriği %12 olarak belirlenmiştir. Materyalin geometrik ortalama çapı 1,64 mm olarak hesaplanmıştır. Peletleme işlemi düz kalıplı 15 kW gücünde olan pelet makinesinde yapılmıştır.



Analizler sonucunda; pelet parça yoğunluğu  $1309,87 \text{ kg/m}^3$ , pelet dayanıklılık direnci %89,57, nem içeriği değeri %11,54 olarak hesaplanmıştır. Yanma sonucu kül içeriği %7,19, baca gazı emisyon değerleri sırası ile CO 1383.67 ppm, CO<sub>2</sub> %0,90, O<sub>2</sub> %19,17, NO 121 ppm, NO<sub>x</sub> 61,67 ppm olduğu görülmüştür [11].

Dağtekin ve arkadaşları (2019), limon budama atıklarından biyoyakıt amaçlı pelet elde etmişlerdir. Çalışmada peletlerin baca gaz emisyonları ve bazı fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Peletlerin parça yoğunluğu  $1236,70 \text{ kg/m}^3$ , nem içeriği %10, mekanik dayanıklılığı %88, sertliği 2951 N olarak bulunmuştur [12].

Atay ve Ekinci (2020), gül yağı işleme atıkları ile kızılçam ağaç kabuğu ve linyit kömür tozu kullanılarak pelet yapılması amaçlanmıştır. Daha sonrasında üretilen peletlerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Öğütülmüş olan yağ gülü damıtma atıkları, kızılçam ağaç kabuğu ve linyit kömür tozundan altı farklı karışım elde edilmiş ve 3 kW motor gücüne sahip ve dairesel sıralı ve delikli düz kalıp peletleme makinesinde peletleme işlemi yapılmıştır. Peletlere yapılan fiziksel, kimyasal, mekanik ve termogravimetrik testlerinin sonucunda, pelet karışımlarında linyit kömür tozu arttıkça pelet parça yoğunluğunun da arttığı gözlenmiştir. Ayrıca termogravimetrik analiz sonuçlarında linyit kömür tozunun fazla olduğu karışımların daha yavaş yandığı ancak yağ gülü damıtma atığının ve kızılçam ağaç kabuğunun fazla olduğu karışımların daha hızlı yandığı belirlenmiştir. Peletlerin kırılma ve sıkıştırma gibi dirençlerinin artırılması için de peletleme işlemi sırasında buhar uygulaması yapılması gerektiği belirlenmiştir [9].

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Materyal

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yürütülen bu çalışmada, enerji amaçlı peletler için materyal olarak fabrikalardan

alınan pamuk çiğidi küspsesi (Şekil 1) ve kırmızıbiber işleme atıkları (Şekil 2) kullanılmıştır. Pamuk çiğidi küspsesi ve kırmızıbiber işleme atıkları kurutulmuş ve ardından sanayi tipi, elek çapı 4 mm olan öğütücü yardımıyla öğütülme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 1. Pamuk çiğidi küspsesi (a) ve kurutulmuş hali (b)



Şekil 2. Kırmızıbiber işleme atıkları (a) ve kurutulmuş hali (b)

Kurutulup öğütülen materyaller, 6 kW motor gücüne sahip peletleme makinesinde peletlenmiştir. Peletleme makinesi dairesel sıralı delikli, boyut ayarlama düzeneğine sahip olup redüktör dönü sayısı 96 d/d ve işleme kapasitesi 70-90 kg/h'dir (Şekil 3).



Şekil 3. Peletleme makinesi



**Çizelge 1.** Pamuk çiğidi küspesi ve kırmızıbiber işleme atıklarından oluşan karışımlar

Materyal	Karışım-1	Karışım-2	Karışım-3	Karışım-4	Karışım-5
PÇK	%100	%75	%50	%25	%0
KB	%0	%25	%50	%75	%100

Peletleme işlemi için kırmızıbiber işleme atıkları (KB) ve pamuk çiğidi küspesinin (PÇK) farklı oranlarda karıştırılması ile 5 farklı karışım oluşturulmuştur (Çizelge 1).

Başlangıç nem oranı %9 olan materyaller, peletleme işlemi için her bir karışım türü ayrı kaplara alınarak %5 sıvı melas ile homojen bir karışım oluşturulmuştur. Oluşturulan bu karışım bir kap yardımı ile peletleme makinesine dökülmüştür. Peletleme makinesinin deliklerinde kesit giderek daralmış ve sürekli pelet çıkışı (Şekil 4) meydana gelmiştir. Bu işlem her karışım türü için tekrar edilmiştir. Bir karışım türünden diğerine geçmeden önce peletleme makinesi ve delikleri temizlenmiştir.



**Şekil 4.** Kullanılan materyallerden elde edilen pelet örnekleri

### 3.1. Metot

Pelet parça yoğunluğunun belirlenebilmesi için her karışım türünden elde edilen peletler içerisinden rastgele 40 adet seçilmiş ve her peletin çap, uzunluk ve kütle değerleri ölçülmüştür. Peletlerin çap ve uzunluk değerleri 0,01 mm hassasiyetine sahip dijital kumpas yardımıyla, kütleleri ise 0,001 hassasiyeti olan hassas terazide yapılan tartma işlemi sonucu belirlenmiştir. Pelet parça yoğunluğu değeri  $\text{kg/m}^3$  cinsinden hesaplanmıştır. Peletlerin; kül içeriği analizi, TS ISO 1171 standardı esas alınarak [13], nem içeriği değeri ASTM D 3173 [14] standardına göre, uçucu madde içeriği analizi, TS ISO 562 [15] standardına göre,

sabit karbon içeriği analizi, ASTM D 3172 standardına [16] göre, toplam karbon ve azot içeriği analizleri AOAC (1990) [17] yöntemine göre belirlenmiştir.

Pelet kırılma direncini belirlemek için, beş farklı karışımın her birinden rastgele 4 adet seçilmiştir. Seçilen bu peletlerin kütleleri ölçülüp kaydedilmiş ve yaklaşık 1,80 m yükseklikten 4 defa sert zemine bırakılmıştır. Daha sonra 3,15 mm delik çapına sahip elek üzerinde elenmiştir. Kütle ölçümü tekrar yapılmıştır. Test sonrası pelet ağırlığının, test öncesi pelet ağırlığına oranlanması ile kırılma direnci % olarak hesaplanmıştır.

Peletlerin üst ısı değeri, Eşitlik 1 kullanılarak belirlenmiştir (Baley and Blankenhorn, 1984).

$$\text{HHV} = 0,312\text{FC} + 0,1534\text{VC} \quad (1)$$

Burada;

HHV : Üst ısı değeri (MJ/kg)  
FC : Sabit karbon içeriği (%)  
VC : Uçucu madde içeriği (%)

Dikey sıkıştırma direnci için her bir karışımdan rastgele 3 adet pelet seçilmiştir. Seçilen peletler tek tek sıkıştırma ünitesine yerleştirilmiş ve peletin kırılması gerçekleşene kadar sabit oranlarla artan sıkıştırma kuvveti uygulanmıştır. Kırılma gerçekleştiği anda sıkıştırma işlemi durdurulmuştur. Sıkıştırma direnci N olarak ölçülmüş ve hesaplanmasında Eşitlik 2 kullanılmıştır (Liu ve arkadaşları, 2014).

$$\sigma_x = \frac{2F}{\pi dl} \quad (2)$$

Burada;

$\sigma_x$  : Dikey sıkıştırma direnci (N)  
F : Uygulanan maksimum kırılma kuvveti (N)  
D : Pelet çapı (m)  
l : Pelet uzunluğu (m)'dur.

Bu testte her bir karışım içinden rastgele seçilen beş adet pelet, etüvde, 105 °C sıcaklıkta yaklaşık 24 saat bekletilmiş ve ilk kütleleri ölçülüp kaydedilmiştir. Daha sonra 27 °C sıcaklıkta ve %90 nem içeriğine sahip olan iklimlendirme kabini içinde bekletilip son kütleleri ölçülüp kaydedilmiştir. Nem alma direnci, Eşitlik 3 yardımıyla % olarak hesaplanmıştır.

$$Pa = \frac{(mf-mi)}{mi} \times 100 \quad (3)$$

Burada;

Pa : Nem alma direnci (%)  
mf : Peletlerin son kütlesi (g)  
mi : Peletlerin ilk kütlesi (g)'dir.

Peletlere ait yanma özelliğinin belirlenmesi amacıyla termogravimetrik analizler yapılmıştır. Numunelerin termal analizleri azot atmosferinde alınmıştır. Toz haline getirilmiş numuneler seramik krozelere konularak 30-920 °C'ye kadar 10 °C/dakika'lık ısıtma oranında analizler yapılmıştır. Beş farklı karışımın her birinden alınan peletler için uygulanan termogravimetrik analizde anlık alınan veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Analiz bittikten sonra diferansiyel termogravimetrik analiz (DTGA) ve termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları grafik olarak verilmiştir. TGA ve DTGA eğrilerinin yardımıyla peletlere ait kütle kayıp oranları, başlangıç bozunma sıcaklığı, maksimum bozunma sıcaklığı ve final bozunma sıcaklığı belirlenmiştir. Araştırmada, tüm veriler 3 tekerrürlü olarak ölçülmüş ve ortalama değerler alınmıştır. Bulunan değerler şekil, çizelgelere aktarılarak ve istatistik analizi yapılarak (SPSS One way anova, Tukey testi) yorumlanmıştır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Peletlerin Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Çalışmada ele alınan farklı oranlardaki peletlerin kimyasal ve ısıl özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Elde edilen peletlerin kül içerikleri %14,38- %19,99 arasında bulunmuştur. Maksimum kül içeriği %100 PÇK'da meydana gelirken karışımlarda PÇK oranı arttıkça kül oranı artmıştır. Nem değerleri %6,58 - %9,59 arasında belirlenmiş olup minimum (%6,58) %50 PÇK + %50 KB karışımında, maksimum (%9,59) %75PÇK + %25 KB karışımında bulunmuştur. Uygun nem içeriği değerinin EN 14774-1 standardına göre [18] ≤10 olması gerekmektedir. Bulunan nem içeriği değerlerinin EN 14774-1 standardına uygun olduğu tespit edilmiştir.

Sabit karbon değerleri %13,57 - %21,27 arasında değişmiştir. Maksimum %100 KB'da olurken minimum ise %100 PÇK'de belirlenmiştir. Karışımlarda KB oranı arttıkça sabit karbondaki artış görülmüştür. Atay ve Ekinci (2020), tarafından yağ gülü damıtma atıkları (YGD), linyit kömür tozu (LKT) ve kızılçam ağaç kabuğu (KAK) ile yapılmış olduğu araştırmada sabit karbon değerlerinin %13,09 - %32,49 arasında olduğunu bildirmiştir. Sabit karbon değerleri yapılan bu çalışma ile benzer aralıkta bulunmuştur.

Uçucu madde içeriği %54,74 - %61,86 arasında değişmiştir. Minimum değer %100 PÇK'de olurken maksimum değer %25 KB + %75 PÇK karışımında meydana gelmiştir. Atay ve arkadaşları (2018) [19] tarafından yapılan çalışmada, LKT'nin %75 oranında kullanıldığı karışımın uçucu madde içeriği değeri %43,8, KAK'nin %75 oranında olduğu karışım ise uçucu madde içeriği %68,5 olarak belirlenmiştir. Bulunan uçucu madde içeriği değerlerinin, Atay ve arkadaşları (2018) tarafından bulunan değerler ile karşılaştırılabilir düzeyde olduğu saptanmıştır.

Oluşturulan 5 farklı karışımdaki peletlerin karbon, azot içerikleri ile üst ısıl değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen peletlerin azot içerikleri incelendiğinde en yüksek değer %100 KB'da %5,56 olarak bulunurken en düşük değer %100 PÇK için %3,80 olarak bulunmuştur. Karbon içeriği hesaplamalarında en yüksek değer %100 KB'da %41,7 olurken en düşük değer %25 KB + %75 PÇK %38,6 olarak bulunmuştur. Hidrojen içerikleri incelendiğinde en yüksek değer %7,10 ile %100 KB'dan oluşan pelet örneğinde bulunmuştur. En

düşük değer ise %6,14 ile %75 PÇK + %100 KB'dan oluşan pelet örneğinde bulunmuştur. Üst ısıl değerlerinden yüksek değer 15,18 MJ/kg değeri ile %50 KB + %50 PÇK'da olurken

minimum değeri ise 13,01 MJ/kg değeri ile %100 PÇK'da elde edilen pelet örneğinde hesaplanmıştır. Karışımda KB oranı arttıkça üst ısıl değerleri artmıştır.

**Çizelge 2.** Farklı oranlardaki peletlerin kimyasal ve ısıl özellikleri

Pelet karışımları	%100 KB	%75 KB + %25 PÇK	%50 KB + %50 PÇK	%25 KB + %75 PÇK	%100 PÇK
Analizler %					
Kül içeriği	14,38	14,84	15,07	15,82	19,99
Nem içeriği	6,79	8,28	6,58	9,59	7,66
Sabit karbon	21,27	20,12	18,38	15,81	13,57
Uçucu madde	54,74	57,26	58,07	61,86	57,20
N	5,56	4,64	4,60	3,83	3,80
C	41,71	38,15	41,63	38,62	41,70
H	7,10	6,54	6,69	6,14	6,62
Enerji değeri (Mj/kg)					
Üst ısıl değeri	15,18	14,52	14,45	14,42	13,01

Farklı oranlardaki peletlere ait parça yoğunluğu değerleri ile çap, uzunluk ve kütle değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Elde edilen peletlerin çapları 6,75-6,98 mm, uzunlukları 24,84-34,48 mm, kütleleri ise 0,91-1,44 g arasında olduğu tespit edilmiştir. Avrupa Pelet Konseyi tarafından hazırlanan el kitabında belirtilen EN16127 [20] standardına göre en uygun pelet çapı 6-8 mm aralığında, pelet uzunluğu ise 3,15-40 mm olarak verilmiştir. Bulunan çap ve uzunluk değerlerinin EN16127 standardına uygun olduğu belirlenmiştir. Araştırma sonucunda pelet parça yoğunluğu değerleri 994,06-1177,51 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. PÇK oranı

artıkça pelet parça yoğunluğu artmıştır. Karışımlar arası pelet parça yoğunluklarında önemli düzeyde farklılık bulunmuştur (P<0,05). Atay ve arkadaşları (2018) [19] şeftali çekirdeği ve linyit kömür tozu kullanılarak üretilen peletlerin parça yoğunluğu değerlerinin 647-1059 kg/m<sup>3</sup> aralığında, Koçer ve arkadaşları (2018) [21] zeytin budama atıklarının peletleme yöntemi ile değerlendirilmesi çalışmasında parça yoğunluğu 981-1232 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlemişlerdir. Bulunan parça yoğunluğu değerlerinin Atay ve arkadaşları (2018) [19] ve Koçer ve arkadaşları (2018) [21] tarafından yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlarla benzer aralıkta olduğu söylenebilir.

**Çizelge 3.** Farklı oranlardaki peletlere ait parça yoğunluğu değerleri ile çap, uzunluk ve kütle değerleri

Peletler	Çap (mm)	Kütle (g)	Uzunluk (mm)	Pelet parça yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
%100 PÇK	6,72	1,44	34,48	1177,51 a
%100 KB	6,80	0,91	24,84	994,06 e
%75PÇK + %25KB	6,75	1,38	26,32	1121,37 b
%50PÇK + %50KB	6,98	1,08	26,32	1072,35 c
%25PÇK + %75KB	6,82	1,26	32,88	1049,01 d

Satır içerisinde aynı harfleri alan değerler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur (P<0,05).

Peletlerin dikey sıkıştırma direnci, kırılma direnci, nem alma oranı Çizelge 4'te verilmiştir.

Karışımlarda dikey sıkıştırma değerler 165,01-319,82 N değerleri arasında bulunmuştur. Maksimum değer %100 PÇK'de olurken minimum değer ise %100 KB'da olmuştur. Karışımlarda PÇK oranı arttıkça dikey sıkıştırma değeri artmıştır. Karışımlar arası dikey sıkıştırma direncinde önemli düzeyde farklılık bulunmuştur ( $P<0,05$ ). Peletlerin dikey sıkıştırılması ile yapılan araştırmalarda; Garsia- Maraver ve arkadaşları 2010 [22] Zeytin dalı ve yapraklarından elde edilen peletlere uygulamasında 40-220 N, Celma ve arkadaşları (2010) [23] domates posası peletleri için yapmış araştırmada en yüksek 88N olarak belirlemiştir. Hesaplanan sıkıştırma direnci Celma ve ark. tarafından bulunan sonuçtan yüksek, Garsia-Maraver ve arkadaşları 2010 tarafından bulunan sonuç ile yakın olduğu saptanmıştır. Bu çalışma ile farklılığın olmasının nedeni materyallerdeki fiziksel ve kimyasal yapılarının farklı olmasından kaynaklanabilir.

Peletlerin kırılma direnci değerleri %99,04-%99,71 aralığında bulunmuştur. Maksimum kırılma direnci %50 PÇK+%50 KB'da olurken, minimum ise %100 PÇK'de meydana gelmiştir. Karışımlar arası kırılma direncinde önemli düzeyde farklılık bulunmamıştır ( $P<0,05$ ). Kırılma direnci değerleri ile yapılan çalışmalarda; Yılmaz, (2014) [10] tarımsal atıkların peletlenmesi ve peletlerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesindeki kırılma direncini %99,26-%99,99, Bilgin ve arkadaşları (2015) [24] fındık zuruğunun peletlenmesi ve pelet fiziksel

özelliklerinin belirlenmesi üzerine yaptığı araştırmada pelet kırılma direncini %99,60 olarak belirlemiştir. Yapılan bu çalışma literatür ile karşılaştırıldığında elde edilen değerler benzer aralıkta olduğu tespit edilmiştir.

Peletlerin taşınma veya depolama süreci boyunca nemin yoğun olduğu ortamlarda bulundurulması peletlerin kalitesini ve dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir [25]. Yüksek miktarda neme maruz kalan peletler kolayca kırılmakta ve toz oluşmaktadır. Bu gibi durumlarla karşılaşmaması için peletler için uygun nem koşulunda taşıma veya depolanması sağlanmalıdır. Elde edilen 5 farklı karışımdan nem alma oranı %20,06 - %23,55 değerleri arasında bulunmuştur. Maksimum nem alma oranı %100 KB'da olurken minimum ise %100 PÇK'de meydana gelmiştir. Karışımlarda KB oranı arttıkça nem alma oranında artma oluşmuştur. Karışımlar arası nem alma oranında önemli düzeyde farklılık bulunmuştur ( $P<0,05$ ). Peletlerinin nem alma oranı ile yapılan diğer çalışmalarda; Alparslan ve arkadaşları (2018) [26] karanfil bitkisine ait biyokütle atıklarının peletlenmesinde parça boyutunun etkisinin araştırmasında nem alma oranını %18-%20 aralığında, Yılmaz, (2018) [27] mısır saplarının peletlenmesi çalışmasında nem alma oranını %11,53 olarak belirlemişlerdir. Bu durumda bulunan nem alma dirençleri Alparslan ve arkadaşları (2018) tarafından yürütülen çalışmada bulunan değere yakın, Yılmaz, (2018) [22] tarafından yapılan çalışmada hesaplanan değerden ise yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılığın olması materyallerin farklı olmasından kaynaklanabilir.

**Çizelge 4.** Farklı oranlardaki peletlerin dikey sıkıştırma direnci, kırılma direnci, nem alma oranı

Peletler	Dikey sıkıştırma direnci (%)	Kırılma direnci (%)	Nem alma oranı (%)
%100 PÇK	319,82 a	99,04 a	20,06 e
%75PÇK+%25KB	275,41 b	99,55 a	20,55 d
%50PÇK+%50KB	209,41 c	99,71 a	21,43 c
%25PÇK+%75KB	183,61 d	99,55 a	21,99 b
%100 KB	165,01 e	99,15 a	23,25 a

Satır içerisinde aynı harfleri alan değerler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur ( $P<0,05$ ).

#### 4.2. Peletlere Uygulanan Termogravimetrik Analizler

Peletlerin yanma karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan en iyi yöntemlerden bir tanesi termogravimetrik analiz (TGA) yöntemidir. Diferansiyel termogravimetrik analiz (DTGA) ise kimyasal tepkimenin sonucunda ortaya çıkan enerji değişimini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir [9]. Farklı oranlarda KB ve PÇK içeren peletlerin, 30-1000 °C sıcaklık aralığında ve 10 °C/dak. artış hızı neticesinde oluşan tüm karışım türlerine ait peletlerin TGA bozunma eğrilerine Şekil 5'de, tüm karışım türlerine ait peletlerin DTGA bozunma eğrilerine ise Şekil 6'da yer verilmiştir. Ayrıca Çizelge 5'de başlangıç bozunma sıcaklığı ( $T_i$ ), maksimum bozunma sıcaklığı ( $T_{max}$ ) ve final bozunma sıcaklığı ( $T_f$ ) verilmiştir.

Pelet örneklerinin TG eğrilerinde önemli ölçüde 2 kütle kaybının meydana geldiği tespit edilmiştir. İlk kütle kaybı 100 °C sıcaklıkta suyun buharlaşması ile gerçekleşmiş olmakla birlikte maksimum su kütlesi kaybı, yaklaşık %9 ile %100 PÇK'dan oluşan pelet örneğinde gerçekleşmiştir. Bu değer %100 KB'dan oluşan pelet için yaklaşık %6, diğer karışım oranlarından oluşan peletler için yaklaşık %8 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen peletlerin 900°C'de maksimum kütle kayıplarının sırası ile %75 PÇK+%25 KB için %77,8, %100 PÇK için %78, %100 KB için %79,6, %50 KB + %50 PÇK için %80,9 ve %75 KB + %25 PÇK için %83,1 olduğu belirlenmiştir (Şekil 5-6).

İlk bozunma sıcaklıkları %100 KB'dan oluşan pelet için 152 °C, %100 PÇK'dan oluşan pelet için 158 °C, %75 PÇK + %25 KB'dan oluşan pelet için 118 °C, %75 KB + %25 PÇK'dan oluşan pelet için 121 °C ve %50 KB + %50 PÇK'dan oluşan pelet için 143 °C'de gerçekleşmiştir (Şekil 5-6, Çizelge 5).

Maksimum bozunma sıcaklıkları %100 KB'dan oluşan pelet için 323 °C, %100 PÇK'dan oluşan

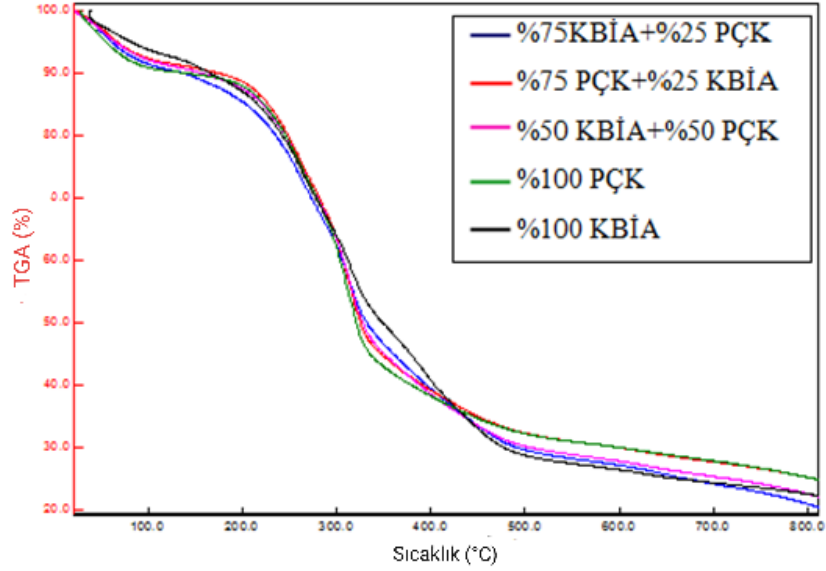
pelet için 310 °C, %75 PÇK + %25 KB'dan oluşan pelet için 325 °C, %75 KB + %25 PÇK'dan oluşan pelet için 315 °C ve %50 KB + %50 PÇK'dan oluşan pelet için 305 °C gerçekleştiği tespit edilmiştir (Şekil 5-6, Çizelge 5).

Elde edilen peletlerde final bozunma sıcaklıkları, %100 KB'dan oluşturulan pelet için 554 °C, %100 PÇK'dan oluşturulan pelet için 500 °C, %75 PÇK + %25 KB'dan oluşturulan pelet için 461 °C, %75 KB + %25 PÇK karışımından oluşturulan pelet için 510 °C ve %50 KB + %50 PÇK karışımından oluşturulan pelet için 517 °C olarak hesaplanmıştır (Şekil 5-6, Çizelge 5).

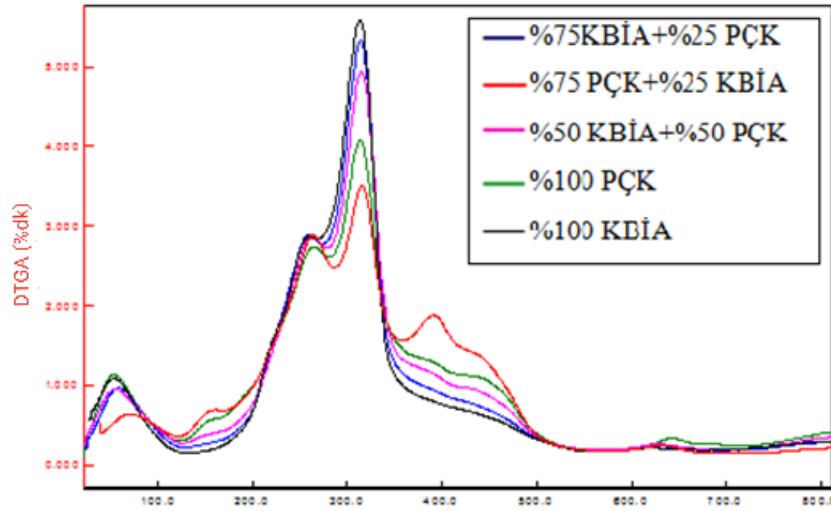
İkinci kütle kayıp oranları ise 3,5-5,5 %/dk arasında değişmiştir. Numunelerin minimum kütle kaybı oranının %100 KB'da 3,5 %/dk, maksimum kütle kaybı oranı ise %100 PÇK'da 5,5 %/dk olarak bulunmuştur (Şekil 5-6, Çizelge 5). Karışımlar arası kütle kaybı oranında önemli düzeyde farklılık bulunmuştur ( $P<0,05$ ). Atay ve Ekinci (2020) tarafından yapılan çalışmada ikinci kütle kaybı oranları 1,43 ile 2,83 %/dk aralığında bulunmuştur ve PÇK ve KB karışımları kullanılarak yapılan çalışmada ki ikinci kütle kaybı oranları ile karşılaştırıldığında bulunan değerlerin Atay ve Ekinci (2020) [9] tarafından yapılan çalışmada bulunan değerlerden yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan analizler neticesinde pamuk çiğidi küspesi atıklarının yoğunlukta olduğu peletlerde yanma işlemi daha itidalli şekilde gerçekleşmiştir.

Kırmızıbiber işleme atıklarının yoğunlukta olduğu peletlerde yanma işlemi daha hızlı şekilde gerçekleşmiştir. Wang (2008) [28] tarafından yapılan çalışmada kütle kaybı oranının düşük ve son tepe sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda yanma işleminin daha mutedil gerçekleştiği belirtilmiştir. Buna göre, karışımlarda PÇK'nin yoğunluğunun artırılmasıyla yanma kalitesi artacağı söylenebilir.



Şekil 5. Tüm peletlerin TGA eğrileri



Şekil 6. Tüm peletlerin DTGA eğrileri

**Çizelge 5.** Kullanılan peletlerin başlangıç bozunma, maksimum bozunma ve final bozunma sıcaklığı ile maksimum kütle kayıp oranları

Peletler	T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	Maksimum kütle kayıp oranı (%/dk)
%100 KB	152	323	554	3,5d
%100 PÇK	158	310	500	5,5a
%75PÇK+%25KB	118	325	461	5,2b
%75KB+%25PÇK	121	315	510	4,2c
%50KB+%50PÇK	143	305	517	5,1b

Satır içerisinde aynı harfleri alan değerler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur ( $P < 0,05$ ).

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Farklı oranlarda karıştıran peletlerde yapılan ölçüm ve değerlendirmelerden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Peletlerin kütle, uzunluk ve çap ölçümleri yapılmış ve bu sonuçların Avrupa Pelet Konseyi'nce belirlenen standartlara uygun olduğu tespit edilmiştir.
- Karışımlarda PÇK oranı arttıkça kül oranı artmıştır.
- Bulunan nem içeriği değerlerinin EN 4774-1 standardına uygun olduğu tespit edilmiştir.
- PÇK oranı arttıkça pelet parça yoğunluğu artmıştır.
- Karışımlarda PÇK oranı arttıkça dikey sıkıştırma değeri artmıştır
- Karışımlarda KB oranı arttıkça nem alma oranında artma oluşmuştur.
- Karışımlarda kütle kayıp oranlarında PÇK oranı arttıkça artma gözlemlenmiştir
- Yapılan termogravimetrik analizler ve diferansiyel termogravimetrik analizler eticesi pamuk çiğidi küspesinin yoğunlukta olduğu peletlerde yanma işleminin daha itidalli şekilde gerçekleşmiştir. Ancak kırmızıbiber işleme atıklarının yoğunlukta olduğu peletlerde ise yanma işleminin daha hızlı gerçekleştiği saptanmıştır.
- %100 PÇK'den üretilen peletler; termogravimetrik analizler, nem alma oranı hesaplamaları, dikey sıkıştırma analizi hesaplamaları neticesinde incelenmiş ve kullanım için uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma ile ilgili şu önerilerde bulunulabilir.

- Kırmızıbiber ve pamuk çiğidi küspesi işleme atıklarının peletlenerek yakıt olarak kullanılması verimlilikleri arttırılabilir.
- Kırmızıbiber işleme atıkları ve pamuk çiğidi küspesi pelet üretimi için uygun materyallerdir.
- Pelet üretiminde tarımsal atıkların kullanılması ile çevre kirliliği azaltılabilir.
- Türkiye'de kırmızıbiber ve pamuk üretiminin önemli düzeyde olmasından dolayı pelet

üretiminde bu materyallerden elde edilecek atıklar kullanılabilir.

- Türkiye'de yetişen diğer tarım ürünlerini pelet üretimi konusunda denemek, elde edilecek enerjinin üretim oranlarını belirlemek veritabanının güçlenmesine katkı sağlayabilir.
- Gelecekte yapılacak çalışmalarda üretilen peletler, nem içeriğinin yüksek olduğu ortamlarda muhafaza edilmemelidir. Eğer muhafaza edilir ise bu durum kütle artışına sebep olabilecek ve pelet kalitesi olumsuz etkilenebilecektir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Şenpınar, A., Gençoğlu, M.T., 2006. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkileri Açısından Karşılaştırılması. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırma Dergisi, 4(2), 49-54.
2. Aybek, A., Üçok, S., 2017. Determination and Evaluation of Biogas and Methane Productions of Vegetable and Fruit Wastes with Hohenheim Batch Test Method. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 10(4), 207-215.
3. Kurtuluş, E., 2004. Yüksek Pirinannın Bir Yakıt Olarak Kullanımı ve Eldesi. Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.
4. Karkania, V., Fanara, E., Zabaniotou, A., 2012. Review of Sustainable Biomass Pellets Production—A Study for Agricultural Residues Pellets' Market in Greece. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(3), 1426-1436.
5. Küsek, G., Güngör, C., Öztürk, H., Akdemir, Ş., 2015. Tarımsal Atıklardan Biyopelet Üretimi. Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi (Journal of Agricultural Faculty of Uludag University), 29(2), 137-145.
6. Aydemir, T., 2017. Farklı Tarımsal Artıklar Kullanılarak Karışım Peletlerinde Kenevir Sapı Kullanımının Pelet Kalite Özellikleri Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ. 79.
7. Küsek, G., Güngör, C., Öztürk, H., Akdemir, Ş., 2015. Tarımsal Atıklardan Biyopelet



- Üretimi. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi (Journal of Agricultural Faculty of Uludağ University) 29 (2), 137-145.
8. Bilgin, S., Koçer, A., Yılmaz, H., Acar, M., Dok, M., 2016. Çay Fabrikası Atıklarının Peletlenmesi ve Pelet Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 33 (Ek sayı),70-80.
  9. Atay, O. A., Ekinci, K. 2020. Characterization of Pellets Made from Rose Oil Processing Solid Wastes/coal Ppowder/pine Bark. Renewable Energy, 149, 933-939.
  10. Yılmaz, H., 2014. Bazı Tarımsal Atıkların Peletlenmesi ve Pelet Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği, Antalya.
  11. Gürdil, G.A.K., Baz, Y.Ö., Dok, M., Acar, M., Demirel, Ç., 2016. Fındık Zurufundan Üretilen Yakıt Peletinin Isısal Parametreleri. 2. Ulusal Biyo-Yakıtlar Sempozyumu, 27-30.
  12. Dağtekin, M., Gürdil, G., Demirel, B., 2019. Bio-energy Potential from Lemon Orchards. 7<sup>th</sup> TAE 17-20 September Prague, Czech Republic.
  13. TS ISO-1171, 2014. Tüm Katı Mineral Yakıtların Kül Miktarının Tayini Yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
  14. ASTM-D3173, 2013. Nem İçeriği Tayin Methodu. American Society for Testing Materials, ABD.
  15. TS 711 ISO-562, 2002. Uçucu Maddenin Tayin Methodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
  16. ASTM-D3172, 1990. Sabit Karbon İçeriği Tayin Yöntemi. American Society for Testing Materials, ABD.
  17. AOAC, 1990. Official Methods of Analysis. 15<sup>th</sup> ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC. US.
  18. EN 14774-1, 2009. Solid Biofuels. Determination of Moisture Content. Oven Dry Method. Total Moisture. British Standards Institution, London.
  19. Atay, O., Ekinci, K., Kaçar, H., Üçok, S., Kumbul, B.S., Aybek, A., 2018. Şeftali Çekirdeği ve Linyit Kömür Tozundan Yapılan Peletlerin Fiziko Mekanik Özellikleri, 1. Uluslararası Tarımsal Yapılar ve Sulama Kongresi Özel Sayısı: 274-280.
  20. EN 16127, 2012 Solid Biofuels-Determination of Length and Diameter of Pellets; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
  21. Koçer, A., Kürklü, A., 2018. Zeytin Budama Atıklarının Budama İle Değerlendirilmesi, Tarım Makinaları Bilim Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science), 14(2), 67-72.
  22. Garcia-Maraver, A., A.F Ramos-Ridao, D.P. Ruiz, Zamorano, M., 2010. Quality of Pellets from Olive Grove Residual Biomass. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), Granada-Spain.
  23. Celma, A.R., Cuadros, F., Rodriguez, F.L., 2012. Characterization of Pellets for Industrial Tomato Residues, Food and Bio products Processing, 90, 700-706.
  24. Bilgin, S., Yılmaz, H., Koçer, A., Acar, M., Dok, M., 2015. Fındık Zurufunun Peletlenmesi ve Pelet Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi, Tarım Makineleri Bilim Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science), 11(3), 265-273.
  25. Kaliyan, N., Morey, R.V., 2009. Factor Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Products. Biomass and Bioenergy, 33, 337-359.
  26. Alparslan, S., Ertekin, C., 2018. Karanfil Bitkisi Biyokütle Atıklarının Peletlenmesinde Parça Boyutunun Etkisi. Tarım Makineleri Bilim Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science), 14(1), 7-13.
  27. Yılmaz, H., 2018. Mısır Saplarının Peletlenmesi ve Pelet Özelliklerinin Belirlenmesi. Mediterranean Agricultural Sciences, 31(3), 269-274.
  28. Wang, C., Wang, F., Yang, Q., Liang, R., 2008. Thermogravimetric Studies of the Behavior of Wheat Straw with Added Coal During Combustion. College of Mechanical & Electronic Engineering, Qingdao University, 266071, China, B I Biomass and Bioenergy, 33, 50-56.

## Al/NbB<sub>2</sub> In-Situ Kompozit Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi

Hüseyin DEMİRTAŞ<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0002-2442-2158  
Erdem KARAKULAK<sup>2</sup> ORCID 0000-0003-3246-6422  
Hari Babu NADENDLA<sup>2</sup> ORCID 0000-0003-4894-7052

<sup>1</sup>TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Karabük Üniversitesi, Karabük

<sup>2</sup>BCAST, Brunel University, Kingston Lane, Uxbridge, Middlesex, UB8 3PH, United Kingdom

Geliş tarihi: 27.07.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: DEMİRTAŞ, H., KARAKULAK, E., NADENDLA, H.B., (2021). Al/NbB<sub>2</sub> In-Situ Kompozit Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 891-899.

### Öz

Bu çalışmada in-situ yöntemi ile Al matriste NbB<sub>2</sub> partikül takviyeli kompozitler üretilmiştir. Farklı oranlarda partikül takviyesinin ve üretim süresinin kompozitler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Oluşan partiküller, boyutları ve dağılımları incelenmiş, tane boyutu ve sertliğe etkisi belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde partikül oluşumunda karıştırma süresinin kullanılan alaşım oranı gibi önemli olduğu belirlenmiş ve en iyi değerler 1,5 saat karıştırma sonucu oluşan %3,75 NbB<sub>2</sub> ilaveli kompozitte elde edilmiştir. Bu kompozitte tane boyutu 112 µm seviyelerine inmiştir ve sertlik 306,4 MPa olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum, Borür, Tane inceltici, Döküm, Kompozit

### Production and Properties of Al/NbB<sub>2</sub> In-situ Composite

#### Abstract

In this study, NbB<sub>2</sub> particle reinforced composites in Al matrix were produced by in-situ method. The effects of particle reinforcement at different ratios and production time on composites were investigated. The size and spatial distribution of the formed particles were examined, and the effect on grain size and hardness was determined. As a result of the studies, it was determined that the mixing time is as important as the alloying ratio in the formation of particles, and the best values were obtained in the 3.75% NbB<sub>2</sub> added composite, which was formed after 1.5 hours of mixing. In this composite, the grain size was reduced to 112 µm and the hardness was 306.4 MPa.

**Keywords:** Aluminium, Boride, Grain refiner, Casting, Composite

---

\* Sorumlu (Corresponding author) yazar: Hüseyin DEMİRTAŞ, [hdemirtas@karabuk.edu.tr](mailto:hdemirtas@karabuk.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Alüminyum matrisli kompozitler, yüksek özgül mukavemetleri ve rijitlikleri, yüksek sertlik ve aşınma direnci gibi matristen kaynaklı ve takviyenin türüne bağlı olarak çeşitli avantajlara sahiptir [1-4]. Bu sebeple metal matrisli kompozitler içerisinde önemli bir yer tutmakta ve ilgili çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Alüminyum bazlı bir matrise TiB<sub>2</sub> (titanyum diborür) [5], SiC (silisyum karbür) [6] ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alüminyum oksit) [7,8] gibi yüksek mukavemetli ve rijit seramik partiküllerin eklenmesi benzersiz bir mukavemet, sertlik, aşınma direnci ve yüksek sıcaklık kararlılığı kombinasyonu sunar. Bu takviyeler arasında iyi ara yüzey, mekanik özellikler ve üretim yöntemlerinin bilinmesi gibi çeşitli avantajları dolayısı ile TiB<sub>2</sub> takviyesi ile üretilen Al matrisli kompozitler ön plana çıkmaktadır ve üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır [9-11]. Bunun yanısıra gösterdiği iyi arayüzey ilişkisi ile ince bir eş eksenli mikro yapı oluşumunu destekleyen TiB<sub>2</sub>, on yıllardır alüminyum endüstrisinde tane inceltici olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [12].

Al alaşımları için kullanılacak Nb, V, Zr, Ta, W, Mo, Ce gibi elementler potansiyel tane inceltici alaşım elementleri olmasına rağmen, yaygın tane inceltici titanyum-bor master alaşımlardır [13]. Alüminyum silisyum alaşımlarında ise Ti-B tane incelticilerinin yeterince etkili olmadığı bilinmektedir. Araştırmacılar ağırlıkça %3'ten fazla silisyum içeren AlSi alaşımlarında Al-5Ti-1B tane inceltici alaşımın etkilerinin bertaraf edildiğini (Si poisoning) göstermiştir [14]. Son zamanlarda yapılan çalışmalar ise NbB<sub>2</sub> ilavesinin de Al alaşımlarında (özellikle Al-Si) iyi bir çekirdekleyici olduğunu göstermiştir [15]. Nb, Ti bazlı intermetalikler ile benzer kafes parametreleri içeren bazı intermetalik (NbB<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Nb) yapılar oluşturur. Bu nedenle,  $\alpha$ -Al fazı ile iyi bir kafes eşleşmesi beklenir, bu da çekirdeklenmeyi

arttırmak için çok önemlidir [16]. Bununla birlikte Nb, Ti'dan daha düşük büyüme kısıtlama faktörüne sahiptir [16].

Geçiş metali boridi olan NbB<sub>2</sub>, yüksek sıcaklıklarda bile korunan yüksek sertlik ve iyi aşınma direnci sergiler. Ayrıca, NbB<sub>2</sub> metal matris kompozit olarak üretilen kesme aletleri, aşınmaya dayanıklı parçalar, yüksek sıcaklık yapısal malzemeler için potansiyel bir malzemedir [17]. Ayrıca NbB<sub>2</sub> partikül takviyeli Al matrisli kompozitler TM yöntemi ile de denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır [18].

Metal matris kompozitler matrise TM yönteminde olduğu gibi katı fazda veya sıvı fazda üretim olarak iki farklı şekilde sentezlenebilir. Sıvı fazda üretim çeşitli avantajlarının yanı sıra, matristeki takviyenin termodinamik dengesizliği, zayıf matris-takviye ara yüzü, takviye parçacıklarının homojen olmayan dağılımı gibi çeşitli problemlere sebep olabilmektedir. Bu sorunların üstesinden gelmek için araştırmacılar kompozitlerin üretiminde in-situ (yerinde) yöntemini kullanmaktadırlar [19]. Bu yöntemde partiküller doğrudan matrise katılmayıp, matris içerisinde süreç boyunca kendiliğinden oluşması sağlanır. In-situ TiB<sub>2</sub> partikül takviyeli Al metal matris kompozitler, Ti ve B tozları [10] kullanılarak veya erimiş alüminyuma K<sub>2</sub>TiF<sub>4</sub> ve KBF<sub>4</sub> tuzları eklenerek [11] eriyik reaksiyon yöntemleriyle üretilmektedir. Öte yandan, yerinde takviye yapmak, uygun bir reaksiyonun kullanılmasını gerektirir, bu nedenle yerinde takviye seçimi, doğrudan katılan (ex-situ) takviyelerden çok daha sınırlıdır.

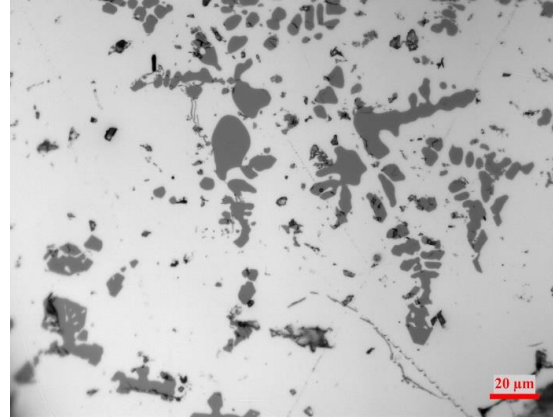
Literatürde in-situ tekniğiyle üretilen NbB<sub>2</sub> partikül takviyeli Al matris kompozitler ile ilgili TM yöntemi ile Al-12Si-xNbB<sub>2</sub> kompozitler üretilmiş fakat sıvı fazda in-situ üretim ile ilgili yeterli çalışma bulunmamaktadır [18]. Bu çalışmada, in-situ yöntemi ile geleneksel döküm

teknîği kullanılarak farklı oranlarda NbB<sub>2</sub> partikül takviyeli ticari saflıktaki alüminyum matrisli kompozitler üretilmiştir. Üretim parametrelerinin kompozitler üzerindeki etkileri; kompozisyon, mikroyapısal, fiziksel ve mekanik özellikler açısından incelenmiştir.

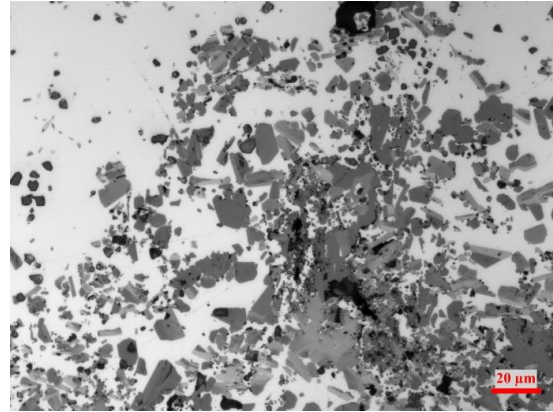
## 2. MATERYAL VE METOT

Alaşımın rezistanslı fırında ısıtılan grafit potalar içerisinde ergitilmiş ve 30 mm çapında silindirik şekilde döküm sağlayan 40 mm duvar kalınlığına sahip kokil kalıba dökümü geleneksel döküm yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Atmosferik nem ana hidrojen kaynağı olabileceğinden, erimiş alüminyum ile temas halinde kullanılan tüm aletler kullanımdan önce kurutulmuştur. Döküm öncesi pota ve kalıp yüzeyleri bor nitrid ile kaplanmış ve karıştırma işlemi için reaksiyona girmeyecek seramik çubuk kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak ticari saflıktaki Alüminyum (ağ. %99,5), partikül oluşumu için ağ. %5 B içeren ve ağ. %3,9 Nb içeren iki farklı Al master alaşım kullanılmıştır. Master alaşımların optik mikroyapı görüntüleri Şekil 1 ve 2'de verilmiştir. Nb master alaşımı genel olarak ortalama 5-40 µm AlNb<sub>12</sub> fazı barındırırken B kaynağı olarak kullanılan master alaşım ortalama 10 µm boyutunda AlB<sub>12</sub> fazını içermektedir. Bunun yanı sıra B master alaşımı üretiminden kaynaklı olarak potasyum ve flor içeren fazlar da içermektedir.

Eriyiğin aşırı ısıtılması, hidrojen emilimini önemli ölçüde artıracaktır. Erimiş alüminyum yüzeyindeki alüminyum oksit filmi sıvı metale gaz girişini sınırlasa da karıştırma ve dökme sırasında türbülans, bu oksit kabuğunu kırarak ve hidrojen emilim oranını artıracaktır. Bu sebeple bekleme süresinin mümkün oldukça kısa tutulması avantaj sağlayacağından bekleme süresi 1 ve 1,5 saat olarak belirlenmiştir ve ergiyik, reaktif olmayan seramik çubuk ile her 10 dakikada bir karıştırılmıştır.



Şekil 1. %3,9 Nb içeren master alaşımının mikroyapı görüntüsü



Şekil 2. %5 B içeren master alaşımlarının mikroyapı görüntüleri

Döküm sıcaklığı tane boyutu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve döküm sıcaklığının düşmesi ile alaşımların tane boyutu azalmaktadır. Bununla birlikte, DiSabatino ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada gösterildiği gibi, döküm sıcaklığı akışkanlığı etkileyen en önemli parametrelerden biridir ve azalan döküm sıcaklığı viskoziteyi olumsuz etkilemektedir [20]. Bu nedenlerden dolayı kompozit üretimindeki bekleme sıcaklığı 850 °C ve döküm sıcaklığı 720 °C olarak belirlenmiştir. Tüm çalışmada soğutma oranını sabit tutarak, partikül ilavelerin tane boyutu üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Bu amaçla aynı katılma koşullarını korumak için kalıp sıcaklığı dökümden önce daima 250 °C'ye ayarlanmıştır.

Nb:B oranı NbAl<sub>3</sub> ve AlB<sub>2</sub> gibi fazları oluşturmaması için literatür [21,22] ve ön çalışmalar doğrultusunda ağırlıkça 4:1 olacak şekilde kullanılmıştır. Master alaşımlar matris içerisinde ağırlıkça %3,75 ve %2,5 oranında NbB<sub>2</sub>

oluşacak şekilde iki farklı kompozisyon üretilmiştir. Bu üretim esnasında karıştırma sürelerinin etkisini belirlemek için iki farklı süre seçilmiştir. Kompozisyonlar ve diğer parametreler Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Üretilen alaşımlar ve üretim parametreleri

Alaşım türü	Kompozisyon (% ağı.)	Karıştırma süresi (h)	Karıştırma sıcaklığı (°C)
A1	Al+3,75 NbB <sub>2</sub>	1	850
A2	Al+3,75 NbB <sub>2</sub>	1,5	850
B1	Al+2,5 NbB <sub>2</sub>	1	850
B2	Al+2,5 NbB <sub>2</sub>	1,5	850

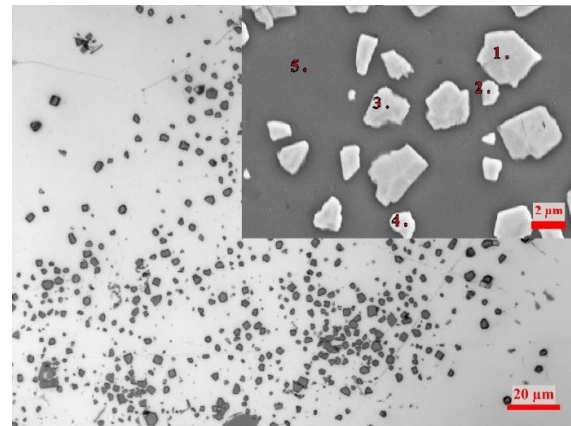
Dökülen kompozitler her birinde kalıbın aynı bölgesine denk gelen noktadan kesilerek analiz ve test numuneleri hazırlanmıştır. 1200 p'ye kadar kademeli zımparalama ve 0,3 µm kolloidal silika ile parlatma işlemi sonrası doğrudan mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Tane boyutu analizi için ise numuneler Per klorik asit (HClO<sub>4</sub>) (20 ml) ve asetik asit (CH<sub>3</sub>COOH) (80 ml) karışımı ile elektrolitik olarak dağlanmış yapılmış ve Carl Zeiss Axioskop 2 MAT optik mikroskopunda polarize ışık altında görüntülenmiştir. Bu şekilde alınan beş farklı görüntü üzerinden ImageJ programı yardımıyla lineer çizgi tane sınırı kesişim metodu (Abrams Intercept method ASTM E 112) ile ortalama tane boyutları (çap) hesaplaması yapılmıştır.

Sertlik değerleri partiküllerin tam üzerinden olmayacak şekilde 10 farklı noktadan Buhler mikro sertlik cihazı ile ölçülmüştür. Numunelerde bulunan fazlar Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem cihazı ile incelenmiş ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analizleri yapılmıştır. Partikül boyut ölçümü de taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri üzerinden yapılmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bir saat karıştırma sonrası üretilen ağırlıkça %3,75 oranında NbB<sub>2</sub> içeren kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Mikroyapıda oluşan partiküllerin tam homojen dağılım göstermemekle birlikte tane sınırları ile de sınırlı kalmadığı görülmektedir. Artan NbB<sub>2</sub> miktarı ile

mikroyapıda bulunan partiküller daha homojen bir dağılım sergilemektedir. Bu durum genel manada takviye faz miktarının yetersiz olduğunu göstermektedir.



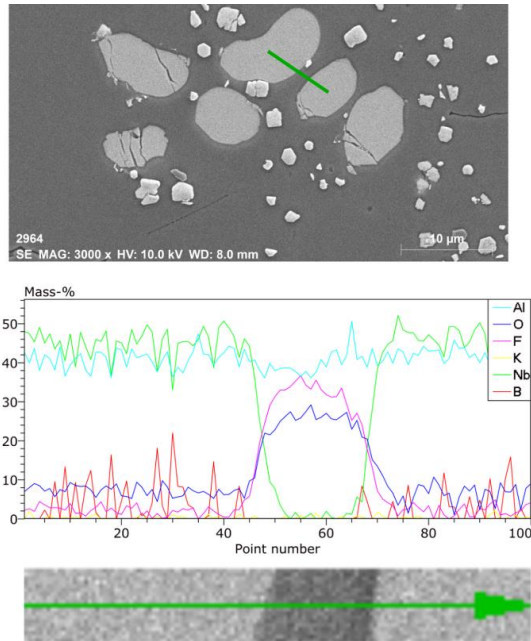
**Şekil 3.** A2 kompozitin genel görünüşü ve oluşan partiküllerin nokta EDS analizleri

**Çizelge 2.** Nokta EDS analiz değerleri.

Spektrum	Atomca oran (%)				
	Al	Nb	B	O	F
1	4,58	22,12	66,95	5,46	0,89
2	3,61	19,95	67,81	6,94	1,69
3	3,04	21,00	68,12	6,86	0,98
4	1,35	22,25	68,16	7,21	1,03
5	27,14	0,06	11,72	32,32	28,76

Şekil 3 üzerinde verilen büyütme görüntüsünde oluşan partiküller ve bazı noktaların EDS analizleri görülmektedir. Çizelge 2'de verilen analiz değerlerinde oluşan partiküllerin NbB<sub>2</sub> olduğunu doğrulamaktadır. Matriste ise B master

alaşımından gelen ( $KBF_4$  tuzundan) F ve üretimden kaynaklı O elementleri görülmektedir. Bunun yanısıra mikroyapının bazı bölgelerinde  $NbB_2$ 'e dönüşmemiş fazlar görülmektedir. A2 alaşımına ait mikroyapı detay görüntüsü ve bu faz üzerinden alınan çizgi EDS analizi Şekil 4'te verilmiştir.

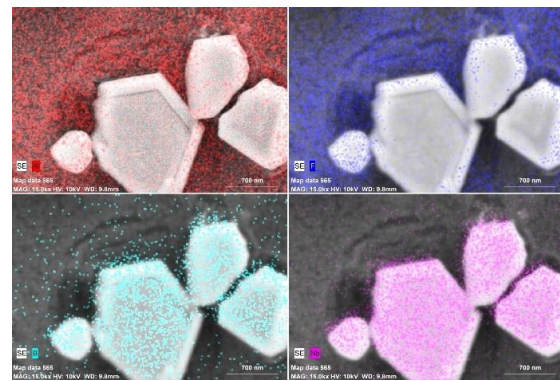


Şekil 4. A2 mikroyapı görüntüsü ve çizgi EDS analizi

Şekil 4'te verilen çizgi analizinde görüldüğü gibi mikro yapıda  $NbB_2$ 'e dönüşmemiş faz Nb ve Al elementleri içermektedir. Verilen analiz değerinin ağırlıkça olduğu hesaba katıldığında bu fazın  $\epsilon$ -fazı ( $NbAl_3$ ) olduğu anlaşılmaktadır [22]. Diğer yandan F ve O oranının matriste belirgin şekilde artması matrisin bu elementleri kalıntı olarak barındırdığını göstermektedir. Ayrıca B miktarı da  $\epsilon$  - fazında lokal olarak artış göstermektedir. Bu fazın B elementi çözme miktarının yaklaşık at. %1 civarında olduğu literatürde dalga boyu dağınım spektroskopisi (WDS) ve EDS analizleri ile ortaya konulmuştur [22].

$NbB_2$  partiküllerin detaylı görüntüleri incelendiğinde bazılarında dış kabuk ve iç kısım arasında görsel olarak konsantrasyon farkı olduğu

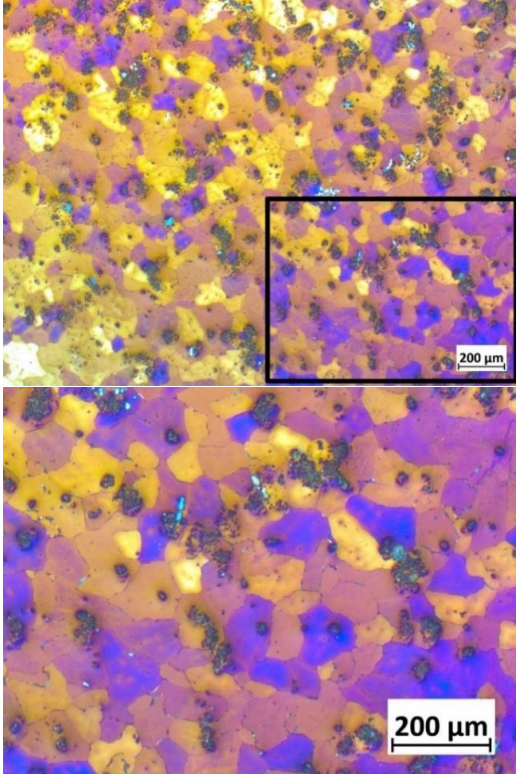
görülmektedir. Şekil 5'te verilen EDS map analizinde bu durum görülmektedir. Matriste genel olarak Al ve F elementleri ve partiküle yakın bölgelerde B görülmekte iken partiküller Nb ve B elementleri içermektedir. Bazı partiküllerin dış çevresinde ise matristen bir miktar geçişlerin olduğu görülmektedir. Bu bölgeler matris ve partikül geçişinde oluşan  $\sigma$ -fazına benzemektedir. Bu faz literatürde Nb-Al-B (at. %55-35-10) oranında elementler içerdiği belirtilmiştir [22].



Şekil 5. A1 kompozit mikroyapı görüntüsü ve EDS alan tarama analizi

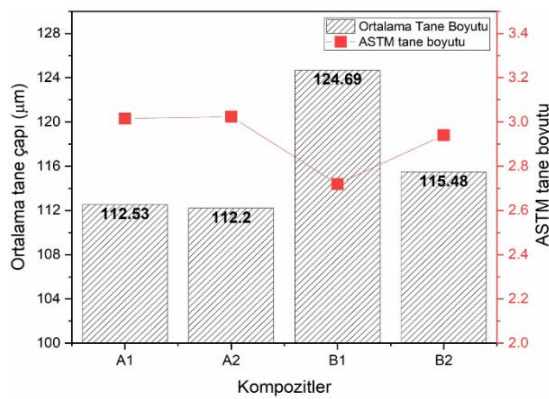
Kompozit içerisinde oluşan partiküller mikroyapı incelemelerinde açıkça belirtilmiştir. Bu partikül oluşumlarının bir diğer avantajı ise tane inceltme etkisidir. Yapılan çalışmalar Nb-B ilavesinin Al alaşımlarındaki tane inceltme etkisini açıkça ortaya koymaktadır [15,16]. Bunun yanında diğer yaygın kullanılan Ti-B ilavesi de dahil tane inceltme mekanizmasının tam bir açıklaması halen yapılamamıştır. Ancak Mohanty ve Gruzleski [23] yaptığı çalışmada Ti ilavesinin olmadığı çözültü borürlerin tane sınırlarına itildiği ve tane inceltme bir etki yapmadığını göstermektedir. Bu çalışmada üretilen kompozitlerde ise oluşan partiküllerin tane sınırları ile kısıtlı kalmadığı görülmektedir. Bu durumun tane inceltme etkisi üzerine olumlu bir etki yapacağı açıktır ki katılma işlemi sırasında her bir  $NbB_2$  partikülü bir tane çekirdeği oluşturmayacaktır. Kalan  $NbB_2$  partiküllerinin ise tane sınırlarına itilmek yerine katılma sırasında ilerleyen sıvı-katı arayüzü tarafından yutulduğu anlaşılmaktadır. Hazırlanan kompozitlerin örnek tane boyutları Şekil 6'da verilmiştir.





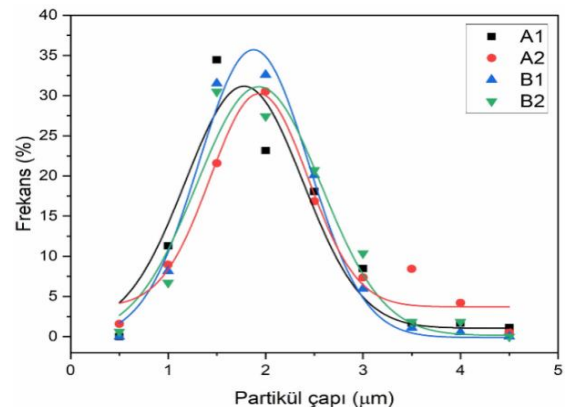
Şekil 6. A2 genel ve detay tane boyut görüntüsü

Şekil 6'da verilen görüntüler incelendiğinde tanelerin eş eksenel ve tane boyutlarının genel olarak benzer dağılım sergilediği görülmektedir. Kompozitler arasında ise belirgin bir fark görülmemiştir. Yapılan tane boyut ölçümlerinin ortalaması ve bu değerlere karşılık gelen ASTM tane boyutları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Kompozitlerin tane boyutları

Şekil 7'de aynı koşullarda üretilmiş takviyesiz saf Al'un tane boyutu verilmemiştir fakat ortalama 1300 µm olarak belirlenmiştir. Bu durum Nb-B ilavesinin etkisini açıkça ortaya koymuş tane boyutları ortalama 1/10 seviyesinin altına düşmüştür. Alaşımlar kendi arasında kıyaslandığında ise alaşım miktarı yüksek olan A1 ve A2 alaşımlarında diğerlerine kıyasla tane boyutlarının daha küçük olduğu görülmektedir. Maxwell ve Hellawell, birim hacim başına tane sayısının, birim hacim başına partikül sayısı ile arttığını, ancak bu artışın kritik bir değere kadar olduğunu ve bu noktanın ötesinde bir doygunluğa ulaştığını göstermiştir. Bu kritik değerinin ötesinde, eklenen partiküllerin güçlü çekirdeklenme yerleri olarak hareket etmediğini göstermiştir [24]. Bu çalışmada kullanılan master alaşım oranlarında kompozitlerin doygunluğa ulaşmadığını göstermektedir. Diğer yandan üretimdeki karıştırma süresi göz önünde tutulduğunda ise A tipi alaşımlarda fark daha az olmak üzere 1,5 saat karıştırılan alaşımlarda 1 saat karıştırılanlara göre ortalama daha ince tane boyutları ölçülmüştür. Yine benzer çalışmaya [24] paralel olarak artan karıştırma süresi ile reaksiyon süresi de artmakta ve bir miktar daha homojen dağılım sağlanabilmektedir. Bu durumda birim hacimdeki homojen dağılımın daha dengeli sağlandığı ve tane inceltmeye bir miktar daha katkı sağladığı görülmektedir. Bunun yanısıra karıştırma sürelerine bağlı reaksiyon süresinin oluşan NbB<sub>2</sub> partikül boyutuna etkisini belirlemek için alaşım içerisinde oluşan NbB<sub>2</sub> partikül boyutları ölçülmüş ve dağılımları Şekil 8'de verilmiştir.

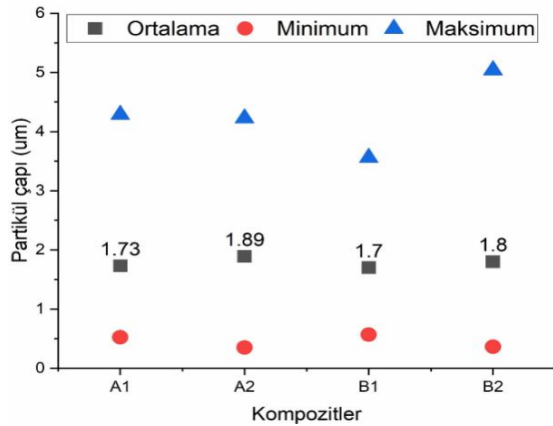


Şekil 8. Partikül boyut dağılımları ve Gauss fit



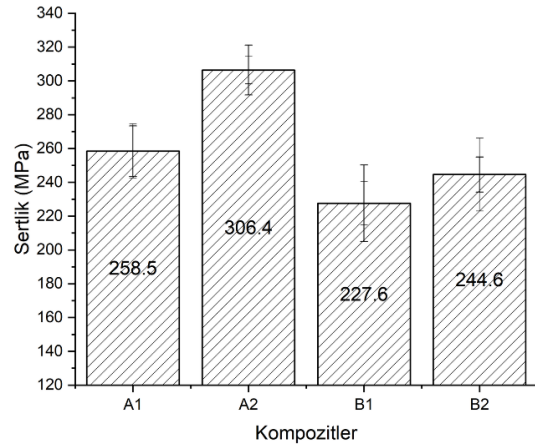
Ortalama partikül boyutları (Şekil 9) incelendiğinde ilk belirgin fark artan karıştırma süreleri ile ortalama partikül boyutları her iki kompozisyonda da artmıştır. Diğer yandan kompozisyon farkının belirgin bir etki oluşturmadığı da görülmektedir. Şekil 8’de verilen partikül boyut dağılımında da tüm kompozitler arasında belirgin bir fark görülmemektedir. En fazla tekrarlanan partikül boyutu ortalama boyuta benzer değerlerdedir.

Partikül boyutunun mekanik özelliklere etkisi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır ve iyi bir matris-partikül ara yüzü olması durumunda genellikle takviye partikül boyutunun azaltılmasının mekanik özelliklerde bir iyileşmeye yol açması beklenir [25]. Yapılan mikro yapı incelemelerinde oluşan  $NbB_2$  partiküllerin Al matris ile reaksiyona girerek matris-takviye arasında farklı bir fazın oluşmadığı görülmektedir. Bu durumda yapıda oluşan partikül boyutunda azalmanın genel manada mekanik özelliklere olumlu bir katkı yapması beklenen bir durumdur.



Şekil 9. Ortalama partikül boyutları

Tane boyutundaki küçülmenin akma dayanımı üzerindeki etkisi Hall-Petch denklemi ile açıklanmıştır [26]. Bu durumda yapılan alaşım ilavesi ile hem partikül mukavemetlendirmesi hem de tane inceltme etkileri ile alaşımların mukavemetinin artması beklenen bir sonuçtur. Alaşımlardan ölçülen ortalama mikro sertlik değerleri alt ve üst değerlerle birlikte Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 10. Alaşımların mikro sertlik değerleri

Alaşımların sertlik değerleri incelendiğinde literatürde verilen saf Al’a göre belirgin bir artış görülmemiştir. Bu durumun temel sebebi ise mikro sertlik yöntemi kullanımıdır. Sertlik artışına sebep olabilecek temel faktörler Al ve Nb-B arasında bir katı çözelti oluşmadığı hesaba katıldığında tane boyutu ve  $NbB_2$  partiküller ve bir miktar kalıntı Nb’ca zengin ikincil fazlar sayılabilir. Fakat ölçümler mikro seviyede yapıldığından dolayı temel belirleyici faktör yapıdaki partiküllerdir. Bununla birlikte ölçülen sertlik değerlerinin Şekil 7’de verilen ortalama tane boyutları ile de ters ilişkili olarak değiştiği görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Yapılan mikroyapı incelemeleri ve EDS analizleri sonucunda saf Al içerisinde master alaşımlar kullanarak in-situ kompozitin oluştuğu görülmüştür. 1 ve 1,5 saat bekleme sürelerinin her ikisinde de  $NbB_2$  partikül oluşumu gerçekleşmiş uzun bekleme süresinde oluşan partiküllerin ortalama boyutunun bir miktar daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça %2,5 ve %3,75 olan iki farklı oranda alaşım ilavesinde de üretim gerçekleşirken yüksek miktardaki ilavede oluşan partikül miktarı daha fazla ve dağılımın daha homojen olduğu görülmüştür.

Mekanik özellikleri geliştirmek için üretilen kompozitler içerisinde oluşan partiküller ile alaşımın tane boyutunun ciddi ölçülerde düştüğü

belirlenmiştir. Bu durumun kompozitin mekanik özelliklerine ilave fayda sağlayacağı açıktır. Yapılan mikro sertlik ölçümlerinde de sertlik değerlerinin tane boyutu ile doğrudan ilişkili olarak değiştiği belirlenmiştir.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce FDT-2020-2288 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca 2219 proje kapsamındaki desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

## 6. KAYNAKLAR

1. Fale, S., Likhite, A., Bhatt, J., 2014. The Wear Behavior of in-situ Al–AlN Metal Matrix Composites. *Trans. Indian Inst. Met.* 67, 841–849.
2. Li, P., Kandalova, E.G., Nikitin, V.I., 2005. In Situ Synthesis of Al–TiC in Aluminum Melt. *Mater. Lett.* 59, 2545–2548.
3. Wang, H., Li, G., Zhao, Y., Chen, G., 2010. In Situ Fabrication and Microstructure of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Mater. Sci. Eng. A*, 527, 2881–2885.
4. Niranjana, K., Lakshminarayanan, P.R., 2013. Dry Sliding Wear Behaviour of in Situ Al–TiB<sub>2</sub> Composites. *Mater. Des.*, 47, 167–173.
5. Mandal, A., Chakraborty, M., Murty, B.S., 2007. Effect of TiB<sub>2</sub> Particles on Sliding Wear Behaviour of Al–4Cu Alloy. *Wear.*, 262, 160–166.
6. Kai, W., Yang, J.M., Harrigan Jr, W.C., 1989. Mechanical Behavior of B<sub>4</sub>C Particulate-reinforced 7091 Aluminum Composite. *Scr. Metall.*, 23, 1277–1280.
7. Wang, S.H., Kao, P.W., 1998. The Strengthening Effect of Al<sub>3</sub>Ti in High Temperature Deformation of Al–Al<sub>3</sub>Ti Composites. *Acta Mater.* 46, 2675–2682.
8. Feng, C.F., Froyen, L., 1997. In-situ Synthesis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiB<sub>2</sub> Particulate Mixture Reinforced Aluminium Matrix Composites. *Scr. Mater.* 36, 467–473.
9. Lakshmi, S., Lu, L., Gupta, M., 1998. In Situ Preparation of TiB<sub>2</sub> Reinforced Al Based Composites. *J. Mater. Process. Technol.*, 73, 160–166.
10. Ramesh, C.S., Ahamed, A., Channabasappa, B.H., Keshavamurthy, R., 2010. Development of Al 6063–TiB<sub>2</sub> in Situ Composites. *Mater. Des.*, 31, 2230–2236.
11. Wang, F., Ma, N., Li, Y., Li, X., Wang, H., 2011. Impact Behavior of in Situ TiB<sub>2</sub>/Al Composite at Various Temperatures. *J. Mater. Sci.* 46, 5192–5196.
12. Antonio, J.A.M., Lfo, L.F.M., 1971. Grain Refinement in Aluminum Alloyed with Titanium and Boron. *Metall. Trans.*, 2, 465–471.
13. Murty, B.S., Kori, S.A., Chakraborty, M., 2002. Grain Refinement of Aluminium and its Alloys by Heterogeneous Nucleation and Alloying. *Int. Mater. Rev.*, 47, 3–29.
14. Johnsson, M., 1994. Influence of Si and Fe on the Grain Refinement of Aluminium. *Zeitschrift Fur Met.*, 85, 781–785.
15. Nadendla, H.B., 2015. Al–Nb–B Master Alloy for Grain Refining.
16. Bolzoni, L., Nowak, M., Babu, N.H., 2015. On the Effect of Nb-based Compounds on the Microstructure of Al–12Si Alloy. *Mater. Chem. Phys.* 162, 340–345.
17. Balci, Ö., Ağaoğulları, D., Ovalı, D., Öveçoğlu, M.L., Duman, I., 2015. In Situ Synthesis of NbB<sub>2</sub>–NbC Composite Powders by Milling-assisted Carbothermal Reduction of Oxide Raw Materials. *Adv. Powder Technol.*, 26, 1200–1209.
18. Tekoğlu, E., Ağaoğulları, D., Mertdinç, S., Paksoy, A.H., Öveçoğlu, M.L., 2018. Microstructural Characterizations and Mechanical Properties of NbB<sub>2</sub> and VB Particulate-reinforced Eutectic Al–12.6 wt% Si Composites Via Powder Metallurgy Method. *Adv. Powder Technol.*, 29, 2070–2081.
19. Pramod, S.L., Bakshi, S.R., Murty, B.S., 2015. Aluminum-based Cast in Situ Composites: a Review. *J. Mater. Eng. Perform.*, 24, 2185–2207.
20. Di Sabatino, M., Shankar, S., Apelian, D., Arnberg, L., 2005. Influence of Temperature and Alloying Elements on Fluidity of Al–Si Alloys. in: TMS–Shape Cast. Symp., 2005.

21. Xu, J., Li, Y., Hu, B., Jiang, Y., Li, Q., 2019. Development of Al–Nb–B Master Alloy with High Nb/B Ratio for Grain Refinement of Hypoeutectic Al–Si Cast Alloys. *J. Mater. Sci.* 54, 14561–14576. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03915-9>.
22. Witusiewicz, V.T., Bondar, A.A., Hecht, U., Zollinger, J., Velikanova, T.Y., 2014. The Al–B–Nb–Ti System. VI. Experimental Studies and Thermodynamic Modeling of the Constituent Al–B–Nb System. *J. Alloys Compd.* 587, 234–250. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.10.142>.
23. Mohanty, P.S., Gruzleski, J.E., 1995. Mechanism of Grain Refinement in Aluminium. *Acta Metall. Mater.*, 43, 2001–2012.
24. Maxwell, I., Hellawell, A., 1975. A Simple Model for Grain Refinement During Solidification. *Acta Metall.* 23, 229–237.
25. Alpas, A.T., Zhang, J., 1994. Effect of Microstructure (Particulate Size and Volume Fraction) and Counterface Material on the Sliding Wear Resistance of Particulate-reinforced Aluminum Matrix Composites. *Metall. Mater. Trans. A.*, 25, 969–983.
26. Hall, E.O., 1951. The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results. *Proc. Phys. Soc. Sect. B.*, 64, 747.



## The Turbulence Intensity Effect on the Flow Characteristics and Aerodynamics of a Circular Cylinder

İlyas KARASU<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-3118-6236

Sergen TÜRMESE<sup>\*2</sup> ORCID 0000-0003-4764-747X

<sup>1</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Aerospace Engineering, Adana

<sup>2</sup>Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Adana

Geliş tarihi: 28.07.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: KARASU, İ., TÜRMESE, S., (2021). The Turbulence Intensity Effect on the Flow Characteristics and Aerodynamics of a Circular Cylinder. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 901-912.

### Abstract

In this investigation, a numerical study about the turbulence intensity effect on the time-dependent flow structure around a circular cylinder employing k- $\omega$  based Detached Eddy Simulation (DES) turbulence model was performed at sub-critical Reynolds number of  $Re=5 \times 10^3$ . According to the numerical analyses, the length of recirculation region reduces as the level of turbulence intensity augments. While the normalized length of recirculation region after the cylinder,  $L_r/D$  is measured as 1.225 at turbulence intensity of  $Tu=0.8\%$ , it reduces to the value of  $L_r/D = 1.0822$  at turbulence intensity of  $Tu=7\%$ . Furthermore, the location of peak negative pressure coefficient moves in downstream direction by increasing turbulence intensity. The drag coefficient,  $C_D$  was observed to increase when turbulence intensity increases from  $Tu=0.8\%$  to 7% and 12%. Thus, it was concluded that the level of turbulence intensity is effective on changing the flow characteristics and aerodynamics of a circular cylinder.

**Keywords:** Bluff body, Subcritical Reynolds number, Turbulence intensity, Turbulence model, Unsteady flow

### Türbülans Şiddetinin Dairesel Bir Silindir Üzerinde Oluşan Akış Yapısına ve Aerodinamiğine Etkisi

#### Öz

Bu araştırmada, kritik altı Reynolds sayısının,  $Re=5 \times 10^3$  olduğu durumda k- $\omega$  tabanlı DES türbülans modeli kullanılarak türbülans şiddetinin dairesel bir silindir etrafındaki zamana bağlı akış yapısı üzerindeki etkisi hakkında sayısal bir çalışma yapılmıştır. Sayısal analizlere göre, türbülans şiddeti arttıkça ayrılmış akış bölgesinin uzunluğu azalmaktadır. Silindirin arka bölgesinde oluşan ayrılmış akış

---

\*Corresponding author (Sorumlu yazar): Sergen TÜRMESE, [stumse@cu.edu.tr](mailto:stumse@cu.edu.tr)

bölgesinin uzunluğu,  $L_s$  silindirin çapı,  $D$  ile boyutsuzlaştırılmış ve bu değer,  $L_s/D$  türbülans şiddetinin  $Tu=0,8$  olduğu durumda  $L_s/D = 1,225$  olarak ölçülürken, türbülans şiddetinin  $Tu=7$  olduğu durumda  $L_s/D = 1,0822$  değerine azalmıştır. Ayrıca silindir yüzeyinde mutlak negatif basınç katsayısının maksimum olduğu nokta, türbülans şiddeti arttıkça silindir arka bölgesinde oluşan durma noktasına yaklaşmıştır. Türbülans şiddetinin,  $Tu=0,8$  olduğunu durumdan  $Tu=7$  ve  $12$  olduğu durumlara arttırıldığında, sürüklenme katsayısının,  $C_D$  arttığı gözlemlenmiştir. Buradan türbülans şiddeti seviyesinin dairesel bir silindir etrafında oluşan akış karakteristiği ve aerodinamiği üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Küt cisim, Kritik altı Reynolds sayısı, Türbülans şiddeti, Türbülans modeli, Kararsız akış

## 1. INTRODUCTION

The cylinder is the most commonly used geometry for the investigations of bluff body aerodynamics and the flow around a cylinder is encountered in many engineering applications [1]. The flow around the cylinder has been experimentally studied by many researchers and its physics has been revealed for Reynolds number within various ranges. When the instantaneous flow pattern around the cylinder is examined, it has been shown that the vortex shedding and fluctuating flow structure takes place after the fluid flow separates from the cylinder surface. The periodic shed of vortices and high-level fluctuations in the wake region may cause problems such as noise and vibration [2,3]. The time-averaged flow structure around the cylinder are composed of two counter rotating vortices in the wake flow region and a separation point. As stated by Najafi et al. [4] the drag coefficient,  $C_D$  and length of the wake region differ in the literature due to the factors such as blockage ratio, turbulence intensity of the free-stream flow, and surface roughness for the same Reynolds number. In addition to the experimental studies, numerical studies investigating flow structure the flow structure around bluff bodies has been increasing. Mannini et al. [5] compared the flow structure around a rectangular cross section by using numerical method of Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (URANS) and Detached Eddy Simulation (DES) turbulence models at Reynolds number,  $Re=21600$ . According to the results, DES always provides results closer to the experimental studies and while URANS gave a partially good results when the edge ratios of rectangle were 5:1, neither 2D nor 3D URANS simulations could give as accurate results as 3D

DES at edge ratios of rectangle, 1:5. You and Kwon [6] investigated the flow structure around a circular cylinder by using Spalarat-Almaras (S-A) model, Spalarat-Almaras (S-A) based DES model and  $k-\omega$  SST based Scale-Adaptive Simulation (SAS) model at Reynolds number,  $Re=3 \times 10^6$ . They revealed that when the destruction term was activated in the DES turbulence model, and the specific dissipation rate was increased in the SAS model, the more accurate results are obtained compared to the RANS model simulations. Uzun and Hussaini [7] carried out Delayed Detached Eddy Simulation (DDES) to investigate the flow behavior around tandem cylinders. In this study, 133 million grid points are performed to assess the sensitivity of the estimations to grid resolution. They stated that DDES results are rather in good agreement with experimental ones. The time-averaged streamline pattern from DDES simulation supply a proof that the separation point of the boundary layer is similar to the one that acquired with PIV experiments. Travin et al. [8] studied DES past a circular cylinder with laminar separation at  $Re=50 \times 10^3$  and with turbulent separation at  $Re=140 \times 10^3$  and  $3 \times 10^6$ . According to them, the results are more accurate with DES turbulence model compared to the URANS turbulence model for laminar separation cases. But the accuracy level of URANS and LES is very close to the each other for turbulent separation case. The Zhao et al. [9] performed a numerical investigation about the flow behavior around a circular cylinder with  $k-\omega$  shear stress transport (SST) based DES turbulence model to investigate massively separated flow. According to the authors, most mean values are not delicate to the resolution and length the spanwise. A difference was observed between the severity of estimated

pressure distributions throughout the surface of the cylinder acquired in this study and some experimental studies. Zhao et al. [10] comprehensively studied the flow structure past a circular cylinder with DES turbulence model at Reynolds number,  $Re=3900$ . In this study the impacts of the spanwise lengths, grid resolutions and numerical schemes are discussed. They revealed that very coarse and fine grids weaken the performance of DES model. According to them, for the steady flow pattern, while second order schemes are sufficiently effective, the higher-order model are necessitated for the time-independent flow characteristics. Karasu [11], used different models of turbulence to determine the unsteady flow structure around the cylinder at  $Re=5000$ . He showed that LES and DES models gave very close results in experimental study in all parameters examined comparing with URANS models. Norberg and Sunden [12] experimentally investigated the influence of the turbulence intensity and Reynolds number on the flow structure past a circular cylinder at Reynolds number within the range of  $2 \times 10^4$  and  $3 \times 10^5$  and turbulence intensities in free-stream flow as 0.1% and 0.4%. They pointed out that pressure forces increase when the turbulence intensity gets higher for Reynolds number smaller than,  $10^5$ , while reverse effect was detected for higher Reynolds numbers. According to authors, the impacts of Reynolds number and turbulence intensity on the root mean square of pressure coefficient at subcritical regime are very significant, but this effect attenuates by increasing Reynolds numbers. It was noticed that the turbulence intensity does not depend on the blockage ratio. Furthermore, when the turbulence intensity increases from 0.1% to 0.4%, the Strouhal number was detected to reduce for Reynolds number smaller than  $10^5$  whereas the Strouhal number increases with increasing turbulence intensity at greater Reynolds numbers. The flow transition regime moves upstream of the cylinder by increase in Reynolds number and/or turbulence intensity [13-14]. In the investigation of Ahn et al. [15], the time-independent heat transfer characteristics of a circular cylinder has been comprehensively studied by numerical model as a function of turbulence intensity of free-stream flow and Reynolds number

According to authors, the frequencies of fluctuations were observed to almost uniform over the whole periphery of cylinder surface. As estimated, the value of heat transfer coefficient augments when the turbulence intensity of free-stream flow gets higher. The authors pointed out that the magnitude of the Strouhal number is independent of the value of the turbulence intensity and it only slightly changes with Reynolds number. Smith and Kuethe [16] carried out flow analysis at the cylinder's stagnation point in cross flow. They revealed that there is a direct proportion eddy viscosity and turbulence intensity. Sunden [17] analytically studied the influence of turbulence intensity and length scale of turbulence on the boundary layer model to investigate turbulence effects in steady flow with a main emphasis on stagnation point. According to them, for a given scale, the Nusselt number was detected to go up with increase in the value of  $TuRe^{1/2}$ .

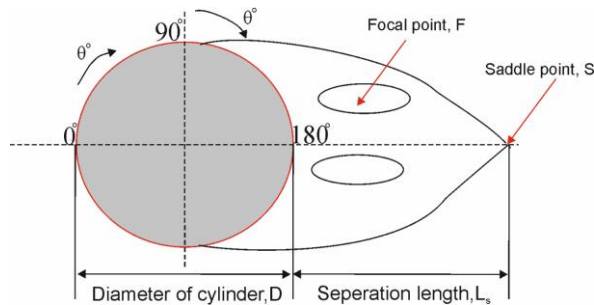
The aim of the present study is to numerically study the effect of a turbulence intensity of free-stream flow on the flow characteristics around a circular cylinder such as drag coefficient,  $C_D$ , pressure distribution, time-averaged streamline and velocity patterns at Reynolds number,  $Re=5 \times 10^3$ .

## 2. MATERIAL VE METHOD

### 2.1. Flow Configuration and Numerical Setup

The description of the essential geometrical and flow parameters for the flow on a circular cylinder is demonstrated in Figure 1 where  $0^\circ$  and  $180^\circ$  denotes front and rear stagnation points, respectively. The flow shown here is from left to the right and the angle,  $\theta$  is measured in downstream direction, from front stagnation point to rear stagnation point. Here  $F$  shows the location of foci and it is the center of vortices.  $S$  is the saddle point that displays the position in the flow region where the velocity of fluid flow is zero.  $S$  also represents the reattachment point.  $L_s$  is the separation length where the distance between rear stagnation point and saddle point,  $S$ . The separation length,  $L_s$  is normalized with the cylinder diameter,  $D$ .





**Figure 1.** The description of the essential geometrical and flow parameters for the flow on a circular cylinder

In all numerical simulations, O type grid structure created using GAMBIT software was utilized. The sizes of the flow field were demonstrated in Figure 2 in terms of the cylinder diameter,  $D$  (not to scale). The diameter of the outer cylinder forming the entire flow field is  $50D$ , and the thickness of the flow field is given as  $11D$  along z-axis. Figure 3 a and b demonstrates the general view of the mesh structure and mesh structure around the cylinder, respectively. The diameter of the cylinder is divided into 200 parts and the y-axis in the region outside of the cylinder is divided into 150 parts, the mesh around the cylinder has become denser, it has been opened regularly towards the inlet and outlet. The thickness of the  $11D$  given to the cylinder was divided into 48 equal parts. As stated by Sidebottom et al. [18], the thickness and number of nodes in the z-axis is sufficient to model the flow.

There are 1479800 nodes in the mesh structure. Surface velocity in the first half of the outer cylinder inlet, surface pressure outlet on the other half and both surfaces of the outer cylinder was chosen as symmetry. In order to show mesh independency, the numerical simulations have been made with four different mesh structures which each one includes different number of nodes. Figure 4 shows the drag coefficient,  $C_D$  values with four different mesh structures. As seen in Figure 4, the difference between drag coefficient,  $C_D$  values are very low for four different generated mesh structures. After approximately  $1.2 \times 10^6$  number of nodes, the drag coefficient,  $C_D$  values does not almost change, so that reason the mesh structure with 1479800 nodes

is chosen for the numerical simulation of 3D flow past a circular cylinder.

The numerical solutions were carried out with a computer with two E3-1240 v5 processors and 32 GB RAM using ANSYS FLUENT 18.1 software with finite volume method. During the simulations with DES model, for pressure and velocity coupling the PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators), for pressure discretization the PRESTO algorithm has been utilized. Limited central differences are used for pressure discretization and second order formulation is used for time-dependent solutions. The minimum orthogonal quality of the generated mesh structure is 0.995.

All solutions were carried out at Reynolds number,  $Re=5 \times 10^3$ . The time step size,  $\Delta t$  was adjusted as  $\Delta t=5 \times 10^{-5}$  s and thus CFL number was kept below one. In this study, same method was applied with Karasu [11]. Flow characteristics and force coefficients on the cylinder depend on many parameters such as Reynolds number, blockage ratio, turbulence intensity of free-stream flow and surface roughness at the cylinder. Therefore, the drag coefficient obtained in this study are consistent with the experimental studies of Najafi et al. [4] and Durhasan et al. [19] performed at similar Reynolds number and turbulence intensities. In this study, the flow characteristics was obtained with PIV method in water channel, and the drag forces was measured in the wind tunnel. Reynolds number, drag coefficient and Strouhal number was calculated based on the Equations of 1, 2 and 3 respectively.

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu}$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho U^2 A}$$

$$S_t = \frac{f D}{U}$$

- (1) In these equations,  $\rho$  is the density of the fluid,  $U$  is the free-stream flow velocity,  $D$  is the diameter of the cylinder,  $\mu$  is the dynamic viscosity of the fluid,  $F_D$  is the drag force,  $A$  is the frontal area of the cylinder which is the multiplication of length,  $L$  and diameter of the cylinder,  $D$ ,  $A=LD$ ,  $f$  is the dominant frequency acquired from lift coefficient.
- (2)
- (3)

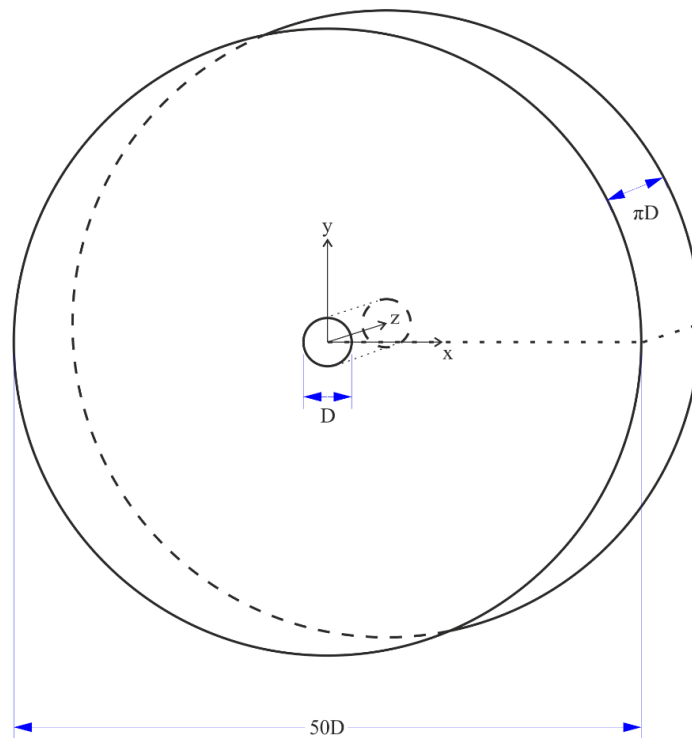


Figure 2. The sizes of flow field in terms of the cylinder diameter,  $D$

## 2.2. Detached Eddy Simulation (DES) Turbulence Modeling

The  $k-\omega$  equations are given in Equations 4-11;

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = G - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \alpha_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \omega)}{\partial x_j} = Y S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \alpha_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) CD_{k\omega} \quad (5)$$

in which,  $G = \min(G, c_1 \beta^* k \omega)$  and  $G = v_t S^2$ .  $F_1$  is a blending that is described as

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4), \arg_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\alpha_\omega k}{CD_{k\omega}^* y^2} \right] \quad (6)$$

in which  $CD_{k\omega}^* = \max(CD_{k\omega}, 10^{-10})$  and  $CD_{k\omega} = 2\alpha_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$ . The whole constant in

transports equations are acquired by blending function;

$$\varnothing = F_1 \varnothing_1 + (1 - F_1) \varnothing_2 \quad (7)$$

where  $\varnothing$  presents  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $Y$  in the  $k$ - and  $\omega$ -equations. The eddy viscosity is described as

$$V_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, b_1 S F_2)} \quad (8)$$

in which  $S$  is the strain rate described as  $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$  and  $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  and  $F_2$  is the other blending function determined as

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2), \arg_2 = \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \quad (9)$$

The whole constants utilized in this study are the identical with the investigation of Menter et al. [20].

### 2.2.1. DES Modification

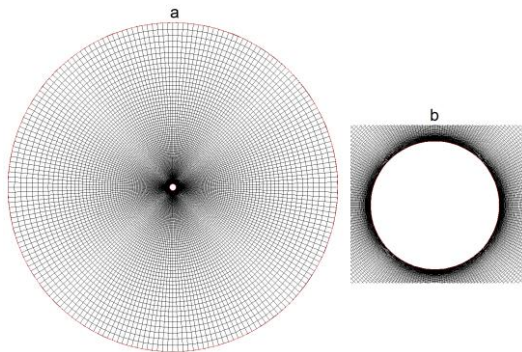
As stated by Menter et al. [20], the  $k$ -equation is altered by adding a production coefficient  $F_{DES}$  to the dissipation term

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (u_j k)}{\partial x_j} = G - \beta^* k \omega F_{DES} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \alpha_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (10)$$

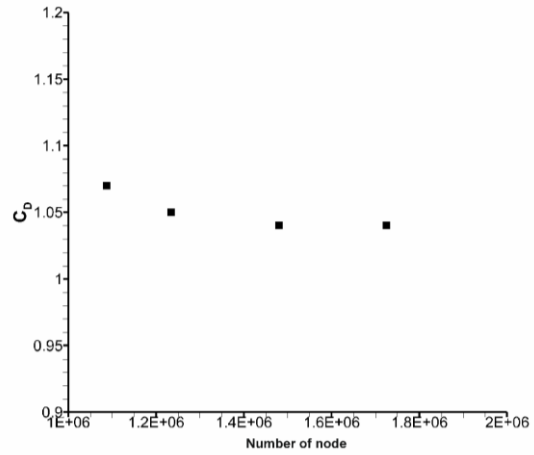
where  $F_{DES}$  is described as

$$F_{DES} = \max \left( \frac{L_t}{C_{DES} \Delta}, (1 - F_S), 1 \right) \quad (11)$$

in which  $L_t$  is the calculated turbulent length scale,  $L_t = \sqrt{k} / (\beta^* \omega)$  and  $\Delta$  is the grid size,  $\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$  is the,  $C_{DES}$  is the DES constant which is equal to 0.61 herein.  $F_S$  can be  $F_1$  or  $F_2$ ,  $F_2$  is utilized in this investigation.



**Figure 3.** a) The general view of the mesh structure b) Mesh structure around the cylinder



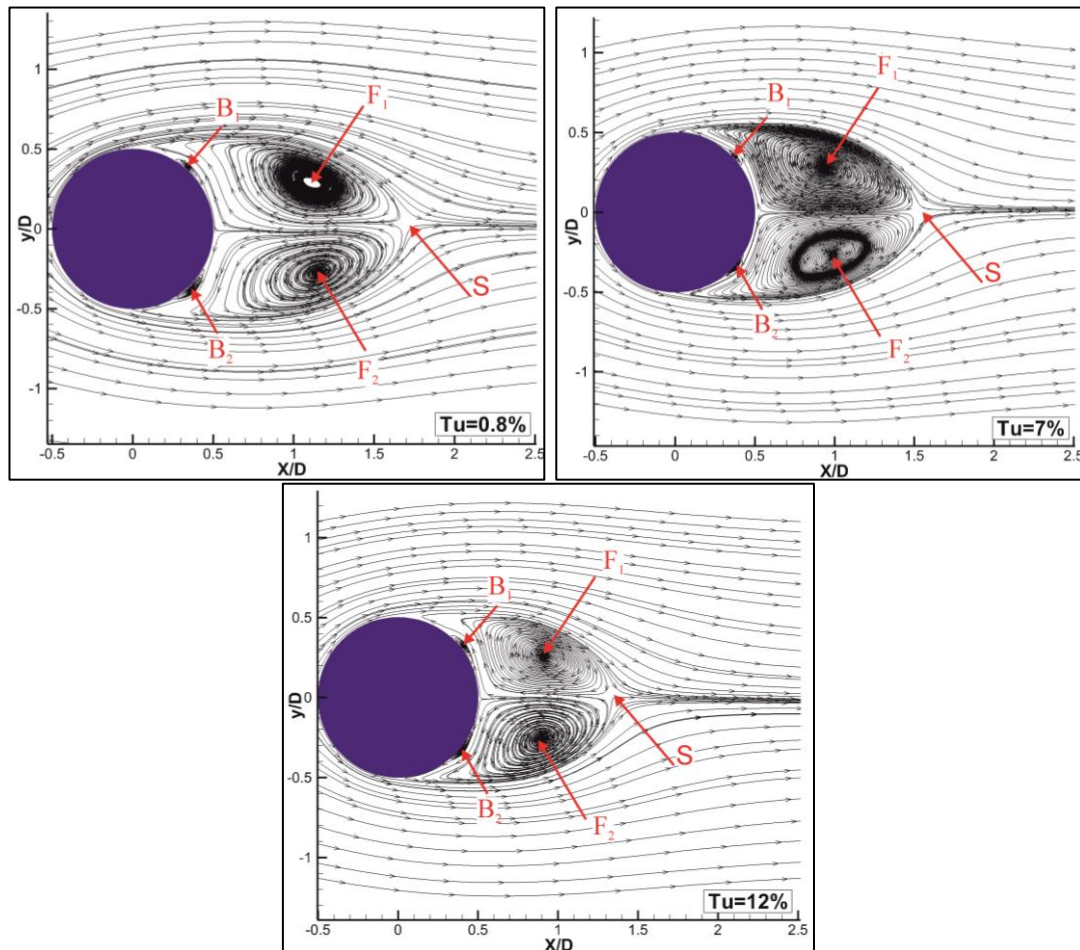
**Figure 4.** Drag coefficient values,  $C_D$  for four different mesh structures with different number of nodes

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 5 demonstrates the effect of turbulence intensity on the time-averaged streamline pattern around the circular cylinder. As seen in Figure 5, when the turbulence intensity increases the length of recirculation region decreases. For instance, while the normalized length of recirculation region after the cylinder,  $L_r/D$  is measured as 1.225 at turbulence intensity of  $Tu=0.8\%$ , it reduces to the value of  $L_r/D = 1.0822$  at turbulence intensity of  $Tu=7\%$ . The dimensionless wake length attenuates to the value of  $L_r/D=0.8542$  when turbulence intensity increases from  $Tu=7\%$  to 12%. Furthermore, the location of saddle point,  $S$  moves in upstream direction toward the rear stagnation point of the cylinder by increasing turbulence intensity. For example, while the saddle point,  $S$  takes place at location of  $X/D=1.725$  at turbulence intensity,  $Tu=0.8\%$  it occurs at dimensionless distances,  $X/D=1.56$  and 1.365 at  $Tu=7\%$  and 12% respectively. Additionally, the extent of focal points,  $F_1$  and  $F_2$  gets smaller by increasing turbulence intensity. As inferred from Figure 5, the distance between focal points,  $F_1$  and  $F_2$  is not remarkably affected by the increase in turbulence intensity. Actually, this distance is correlated with the drag coefficient on the cylinder surface. Drag coefficient attenuates when the distance between

focal points get smaller. The formation of small circulation bubbles,  $B_1$  and  $B_2$  takes place on the cylinder surface as seen in Figure 1. The extent of these bubbles,  $B_1$  and  $B_2$  reduces by increasing

turbulence intensity. Furthermore, the formation of these bubbles,  $B_1$  and  $B_2$  moves towards the rear stagnation point of the cylinder by increasing turbulence intensity.



**Figure 5.** The effect of turbulence intensity on the time-averaged streamline pattern around the cylinder

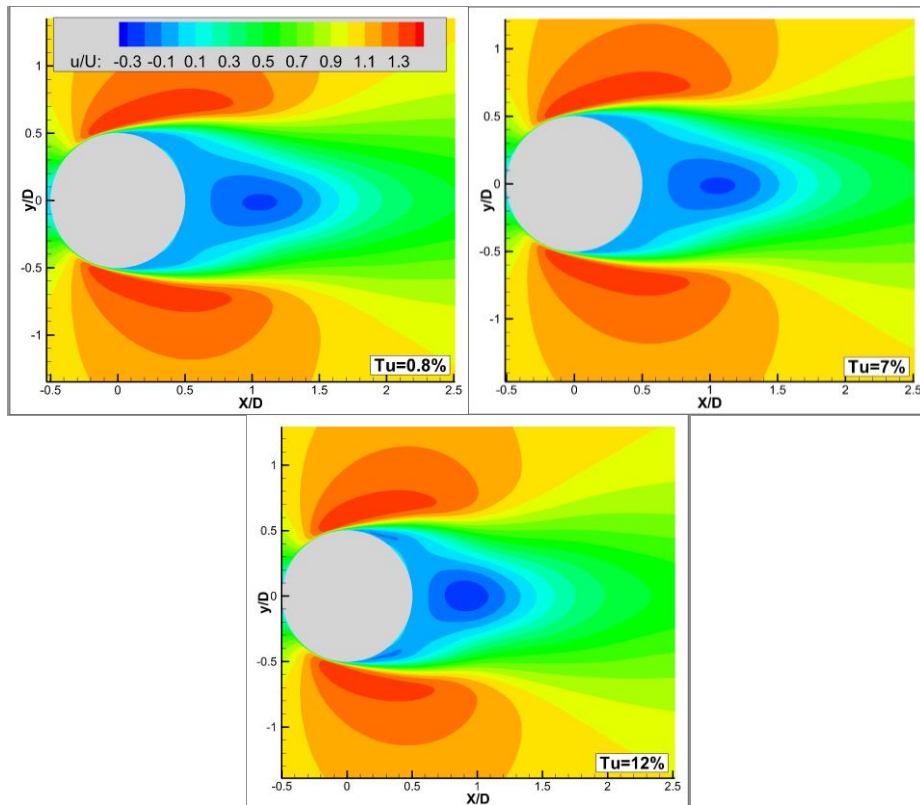
Figure 6 shows the effect of turbulence intensity on the time-averaged streamwise velocity distribution around the cylinder. The time-averaged streamwise velocity,  $u$  is normalized with the free-stream velocity,  $U$ . As observed from the Figure 6, the extent of wake region in horizontal direction behind the cylinder gets smaller by increasing turbulence intensity which can also be revealed from the streamline pattern in Figure 5. But the size of this region remains unchanged in vertical direction. The increasing turbulence

intensity caused the absolute magnitude of peak negative and positive velocities to be higher. Furthermore, the size of maximum peak negative velocity clusters grows up when turbulence intensity increased from  $Tu=0.8\%$  to  $12\%$ . The increased turbulence intensity induced narrower wake region and higher absolute magnitudes of positive and negative velocities can be attributed to the higher momentum of fluid flow at higher turbulence intensities.

As inferred from Table 1, the drag coefficient,  $C_D$  gets higher when turbulence intensity increases from  $Tu=0.8\%$  to  $7\%$  and  $12\%$ . For instance, the drag coefficient,  $C_D$  increases from  $1.039$  to  $1.128$  as turbulence intensity goes up from  $Tu=0.8\%$  to  $12\%$ . But this increase is not much since the drag coefficient grows by  $8\%$  while turbulence intensity increases by  $15$  times. The drag increase can be attributed to the turbulence intensity induced increase in friction and pressure over the surface of the cylinder as concluded from mean pressure and shear stress distribution on the cylinder surface. When the turbulence intensity increases, the more fluid molecules hit the cylinder surface and thus the friction between cylinder surface and fluid molecules increases causing higher drag coefficients,  $C_D$ . The increase in the drag coefficient with turbulence intensity was also reported in the investigation of Norberg [21]. In this study, the drag coefficient,  $C_D$  was found to

increase from  $0.98$  to  $1.03$  when turbulence intensity alters from  $0.1\%$  to  $1.4\%$  at Reynolds number,  $Re=3\times 10^3$ . Furthermore, as noticed, the value of drag coefficient,  $C_D$  in the study of Norberg [21] at turbulence intensity of  $Tu=1.4\%$  is nearly same with the current study at  $Tu=0.8\%$ .

Table 2 demonstrates the impact of the turbulence intensity on the root mean square (RMS) of lift coefficient,  $C_L$  of the cylinder. As seen in Table 2, RMS of lift coefficient gets higher by increasing turbulence intensity. For example, RMS of lift coefficient increases from  $0.236$  to  $0.417$  when the turbulence intensity grows from  $Tu=0.8\%$  to  $12\%$ . The reason of the increase in the RMS of lift coefficient,  $C_L$  with turbulence intensity is the enhancement of momentum transfer. The increasing turbulence intensity augments the momentum of fluid molecules in all flow regions around the cylinder.



**Figure 6.** The effect of turbulence intensity on the normalized time-averaged streamwise velocity,  $u/U$  distributions around the cylinder

**Table 1.** The influence of turbulence intensity on the drag coefficient,  $C_D$  of the cylinder

Turbulence intensity (%)	Drag coefficient, $C_D$
0.8	1.039
7	1.070
12	1.128

**Table 2.** The turbulence intensity effect on the root mean square (RMS) of lift coefficient,  $C_L$  of the cylinder

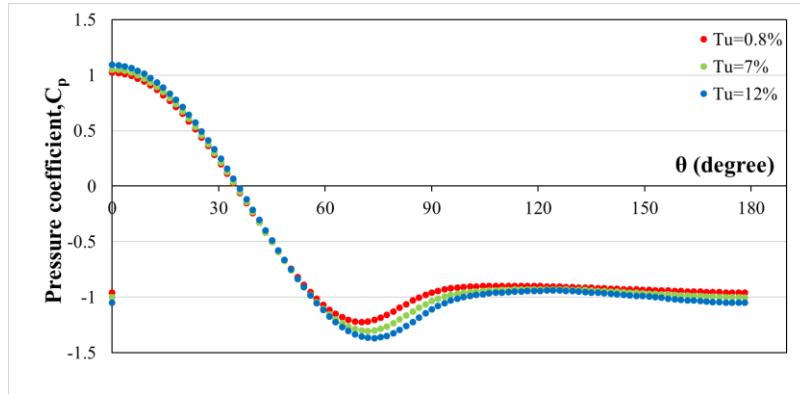
Turbulence intensity (%)	RMS of lift coefficient, $C_L$
0.8	0.236
7	0.310
12	0.417

Figure 7 demonstrates the turbulence intensity effect on the mean pressure coefficient,  $C_p$  distribution around the circular cylinder at Reynolds number,  $Re=5 \times 10^3$ . Due to the quite symmetrical pressure distribution around the cylinder just a half of the circumferential distribution ( $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ) is demonstrated. Figure 7 shows that the increasing turbulence intensity have an effect on the decreasing peak negative pressure coefficient. For instance, while the peak negative pressure coefficient was observed as -1.22, at turbulence intensity,  $Tu=0.8\%$ , it was observed as -1.30 and -1.36 when the turbulence intensity was increased to  $Tu=7\%$  and  $12\%$  respectively. The increase in the peak negative magnitude of pressure coefficient,  $C_p$  denotes the pressure induced drag increase which will be discussed in following sections. In the region of  $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ , the mean pressure coefficient distribution is almost identical for three turbulence intensity value. So, in this region, the mean pressure coefficient is independent from turbulence intensity for this Reynolds number,  $Re=5 \times 10^3$ . But for the region of  $60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ , the distribution of mean pressure coefficient considerably alters by the increase in turbulence intensity. Because in this region, the laminar separation starts at different location on cylinder surface at different turbulence intensities. As seen in Figure 7, the location of peak negative pressure coefficient moves in downstream direction by

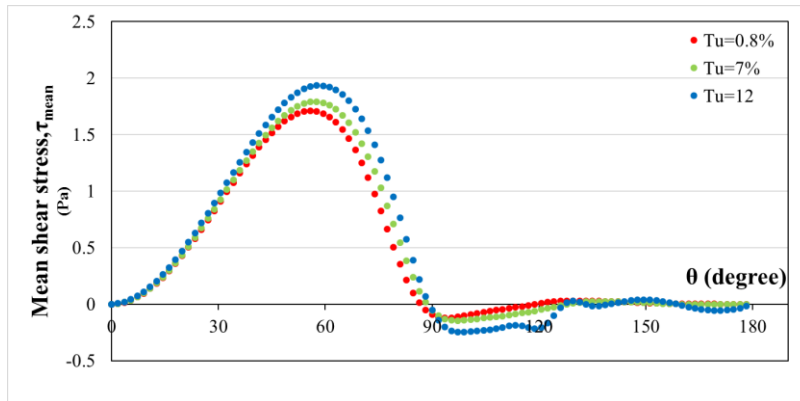
increasing turbulence intensity. For instance, at turbulence intensity of  $Tu=0.8$ , the peak negative magnitude of pressure coefficient is  $C_p=-1.222$  occurs at location on cylinder surface  $\theta=70.22^\circ$ . On the other hand, at turbulence intensity,  $Tu=7$  the peak magnitude pressure coefficient  $C_p=-1.30$  takes place at position on cylinder surface of  $\theta=72.02^\circ$ . In Figure 7, the point where the  $C_p$  distribution over the cylinder surface becomes straight denotes the separation location on the cylinder surface. As observed, the point where  $C_p$  distribution becomes straight moves towards the rear stagnation point by increasing turbulence intensity. In other words, laminar separation over the cylinder surface delayed by increasing turbulence intensity which will be discussed in the Figure 8. The distribution of mean pressure coefficient,  $C_p$  is consistent with the studies of [21-24].

The turbulence intensity effect on the mean shear stress,  $\tau_{mean}$  distribution over the cylinder surface at Reynolds number,  $Re=5 \times 10^3$  is demonstrated in Figure 8. The shear stress distribution on the cylinder surface is correlated to the friction coefficient distribution,  $C_f$  with a relation of  $C_f = 2\tau_w/\rho U^2$ . As observed from Figure 8, the shear stress over the cylinder surface augments with increasing turbulence intensities. The increasing shear stress distribution with turbulence intensity causes higher friction forces on the cylinder surface. Thus, the friction induced drag coefficient gets higher by increasing turbulence intensity which will be discussed in the following sections. In this figure, the points where the mean shear stress,  $\tau_{mean}$  thus friction coefficient,  $C_f$  is equal to zero denotes the laminar separation location on the cylinder surface. As interpreted from the Figure, the point where the mean shear stress,  $\tau_{mean}$  is zero moves toward the rear stagnation point of the cylinder, in other words laminar separation on cylinder surface is delayed by increasing turbulence intensity. The increased mixing by increased turbulence intensity makes the boundary layer to resist a higher adverse pressure gradient and thus the separation is postponed by increasing turbulence intensity.

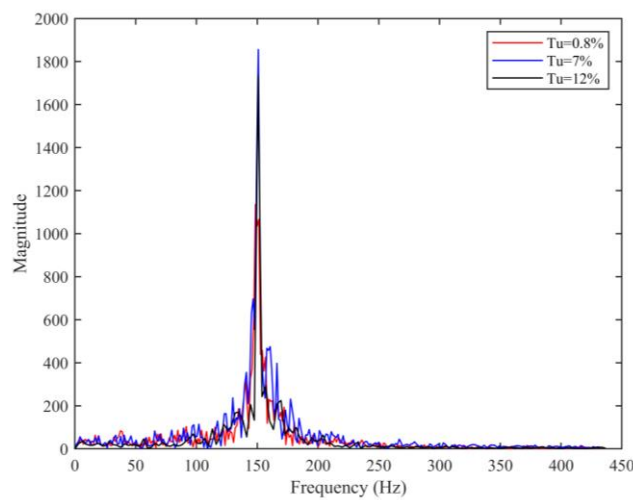




**Figure 7.** The effect of turbulence intensity on the mean pressure coefficient,  $C_p$  distribution on the cylinder surface



**Figure 8.** The turbulence intensity effect on the mean shear stress,  $\tau_{mean}$  distribution over the cylinder surface



**Figure 9.** The turbulence intensity effect on the vortex shedding frequency on the cylinder



In fluid dynamics, adverse pressure gradient happens as the static pressure gets higher in the flow direction. Figure 9 demonstrates the effect of turbulence intensity on the vortex shedding frequency or Strouhal number on the circular cylinder. As seen in Figure 9, the increasing turbulence intensity does not have an effect on the dominant peak vortex shedding frequency,  $f$ . Because the dominant peak vortex shedding frequency,  $f$  is equal to the 150 Hz for three examined turbulence intensity case,  $Tu=0.8\%$ ,  $7\%$  and  $12\%$  with corresponding Strouhal number of  $St=0.205$  based on the Equation 3. In this equation, dominant peak vortex frequency,  $f$  is the 150 Hz, the cylinder diameter,  $D$  is the 0.01 meter and free-stream velocity,  $U$  is the 7.30 m/s thus the Strouhal number,  $St$  equals to 0.205. The calculated Strouhal number is very consistent to the ones computed in the study of Norberg [21]. He was observed the Strouhal number as  $St=0.213$  and  $0.209$  at turbulence intensities of  $Tu=0.1\%$  and  $1.4\%$ , respectively at Reynolds number,  $Re=3\times 10^3$ . Furthermore, Ahn et al. [15] stated that the magnitude of the Strouhal number is independent of the value of the turbulence intensity and it only slightly changes with Reynolds number which is consistent with the current study.

#### 4. CONCLUSIONS

In this study, the impact of the turbulence intensity on the flow structure of the circular cylinder was numerically investigated at sub-critical Reynolds number of  $Re=5\times 10^3$  and turbulence intensities of  $Tu=0.8\%$ ,  $7\%$  and  $12\%$ . The unsteady flow structure was analyzed with k- $\omega$  based DES turbulence model in Ansys Fluent package program. According to this study, the position of saddle point,  $S$  approaches to the rear stagnation point of the cylinder in upstream direction by increasing turbulence intensity. For instance, whereas the saddle point,  $S$  occurs at the dimensionless location of  $X/D=1.725$  at turbulence intensity,  $Tu=0.8\%$  it happens at dimensionless locations,  $X/D=1.56$  and  $1.365$  at  $Tu=7\%$  and  $12\%$  respectively. The increasing turbulence intensity have an effect on the decreasing peak negative pressure coefficient. For example, whereas the peak negative pressure coefficient was detected as

-1.22, at turbulence intensity,  $Tu=0.8\%$ , it was detected as -1.30 and -1.36 when the turbulence intensity was raised to  $Tu=7\%$  and  $12\%$  respectively. The increase in the peak negative magnitude of pressure coefficient,  $C_p$  denotes the increase in pressure induced drag. Furthermore, the position of peak negative pressure coefficient approaches to the rear stagnation point of the cylinder by increasing turbulence intensity. The increasing turbulence intensity caused the absolute magnitude of peak negative and positive velocities to be higher. The location in which the mean shear stress,  $\tau_{mean}$  is zero moves toward the rear stagnation point of the cylinder, in other words laminar separation on cylinder surface is delayed by increasing turbulence intensity. The increased mixing by increased turbulence intensity makes the boundary layer to resist a higher adverse pressure gradient and thus the separation is postponed by increasing turbulence intensity. Finally, the drag coefficient,  $C_D$  increases as turbulence intensity gets higher from  $Tu=0.8\%$  to  $7\%$  and  $12\%$ ; namely, it has been concluded that the drag coefficient,  $C_D$  has raised from 1.039 to 1.128 as turbulence intensity augments from  $Tu=0.8\%$  to  $12\%$ .

#### 5. REFERENCES

1. Pinar, E., Ozkan, G. M., Durhasan, T., Aksoy, M.M., Akilli, H., Sahin, B., 2015. Flow Structure Around Perforated Cylinders in Shallow Water. Journal of Fluids and Structures, 55, 52-63.
2. Ozgoren, M., Pinar, E., Sahin, B., Akilli, H., 2011. Comparison of Flow Structures in the Downstream Region of a Cylinder and Sphere. International Journal of Heat and Fluid Flow, 32(6), 1138-1146.
3. Rashidi, S., Hayatdavoodi, M., Esfahani, J.A., 2016. Vortex Shedding Suppression and Wake Control: A Review. Ocean Engineering, 126, 57-80.
4. Najafi, L., Firat, E., Akilli, H., 2016. Time-averaged Near-wake of a Yawed Cylinder. Ocean Engineering, 113, 335-349
5. Mannini, C., 2015. Applicability of URANS and DES Simulations of Flow Past Rectangular

- Cylinders and Bridge Sections. *Computation*, 3(3), 479-508.
6. You, J.Y., Kwon, O.J., 2010. Numerical Comparisons Between URANS and Hybrid RANS/LES at a High Reynolds Number Flow Using Unstructured Meshes. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 11(1), 41-48.
  7. Uzun, A., Yousuff Hussaini, M., 2012. An Application of Delayed Detached Eddy Simulation to Tandem Cylinder Flow Field Prediction. *Computers and Fluids*, 60, 71-85.
  8. Travin, A., Shur, M., Strelets, M., Spalart P., 1999. Detached-Eddy Simulations Past a Circular Cylinder. *Flow, Turbulence and Combustion*, 63, 293-313.
  9. Zhao, W., Wan, D., Sun R., 2016. Detached-Eddy Simulation of Flows Over a Circular Cylinder at High Reynolds Number. Twenty-Sixth International Ocean and Polar Engineering Conference.
  10. Zhao, R., Yan, C., 2012. Detailed Investigation of DETACHED-EDDY Simulation for the Flow Past a Circular Cylinder at  $Re=3900$ . *Applied Mechanics and Materials*, 232, 471-476.
  11. Karasu, I., 2019. Silindir Etrafındaki Kararsız Akışın Farklı Türbülans Modelleri ile Sayısal Olarak İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 77-84.
  12. Norberg, C., Sunden, B., 1987. Turbulence and Reynolds Number Effects on the Flow and Fluid Forces on a Single Cylinder in Cross Flow. *Journal of Fluids and Structures*, 1(3), 337-357.
  13. Bloor, M.S., 1964. The Transition to Turbulence in the Wake of a Circular Cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 19(02), 290.
  14. Gerrard, J.H., 1965. A Disturbance-sensitive Reynolds Number Range of the Flow Past a Circular Cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 22(01), 187.
  15. Ahn, J., Sparrow, E., Gorman, J., 2017. Turbulence Intensity Effects on Heat Transfer and Fluid-flow for a Circular Cylinder in Crossflow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 113, 613-621.
  16. Smith, M.C., 1966. Effects of Turbulence on Laminar Skin Friction and Heat Transfer. *Physics of Fluids*, 9(12), 2337.
  17. Sundén, B., 1979. A Theoretical Investigation of the Effect of Freestream Turbulence on Skin Friction and Heat Transfer for a Bluff Body. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 22(7), 1125-1135.
  18. Sidebottom, W., Ooi, A., Jones, D., 2015. A Parametric Study of Turbulent Flow Past a Circular Cylinder Using Large Eddy Simulation. *Journal of Fluids Engineering*, 137(9), 091202.
  19. Durhasan, T., Pinar, E., Ozkan, G. M., Akilli, H., Sahin, B., 2019. The Effect of Shroud on Vortex Shedding Mechanism of Cylinder. *Applied Ocean Research*, 84, 51-61.
  20. Menter, F.R., Kuntz, M., Langtry, R., 2003. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 4(1), 625-632.
  21. Norberg, C., 1987. Effects of Reynolds Number and a Low-intensity Freestream Turbulence on the Flow Around a Circular Cylinder, Chalmers University, Goteborg, Sweden, Technological Publications, 1-55.
  22. Moussaed, C., Wornom, S., Salvetti, M.V., Koobus, B., Dervieux, A., 2014. Impact of Dynamic Subgrid-scale Modeling in Variational Multiscale Large-eddy Simulation of Bluff-body Flows. *Acta Mechanica*, 225(12), 3309-3323.
  23. Pang, A.L., Skote, M., Lim, S.Y., 2016. Modelling High Re Flow Around a 2d Cylindrical Bluff Body Using the  $k-\omega$  (sst) Turbulence Model. *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, 16(1), 48.
  24. Wang, H.F., Zhou, Y., Mi, J., 2012. Effects of Aspect Ratio on the Drag of a Wall-mounted Finite-length Cylinder in Subcritical and Critical Regimes. *Experiments in Fluids*.

## Machine Learning Approach for Predicting Employee Attrition and Factors Leading to Attrition

İrem ERSÖZ KAYA\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-5553-3881  
Oya KORKMAZ<sup>2</sup> ORCID 0000-0003-4570-803X

<sup>1</sup>Tarsus University, Faculty of Engineering, Computer Engineering Department, Tarsus

<sup>2</sup>Tarsus University, Faculty of Applied Sciences, International Trade and Logistics Department, Tarsus

Geliş tarihi: 07.06.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: KAYA, İ.E., KORKMAZ, O., (2021). Machine Learning Approach for Predicting Employee Attrition and Factors Leading to Attrition. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 913-928.

### Abstract

In this study that aims to prevent the attrition of human resource which is so important for enterprises, as well as to prevent the leave of employment which is the natural result of such attrition, employee attrition and factors causing attrition are tried to be determined by predictive analytics approaches. The sample dataset which contains 30 different attributes of 1470 employees was obtained for the analysis from a database provided by IBM Watson Analytics. In the study, seven different machine learning algorithms were used to evaluate the prediction achievements. The gain ratio approach was preferred in determining the factors causing attrition. The key point of the study was to cope with the imbalanced data through resampling with bootstrapping. Thereby, even in the blind test, prospering prediction performances reaching up to 80% accuracy were achieved in robust specificity without sacrificing sensitivity. Therewithal, the effective factors causing attrition were investigated in the study and it was concluded that the first 20 attributes ranked according to their gain ratio were sufficient in explaining attrition.

**Keywords:** Employee attrition, Predictive analytics, Machine learning, Feature selection, Data mining

### Çalışan Yıpranmasının ve Yıpranmaya Neden Olan Faktörlerin Tahmininde Makine Öğrenimi Yaklaşımı

#### Öz

İşletmeler için oldukça önemli olan insan kaynağının yıpranmasının ve yıpranmanın doğal sonucu olan işten ayrılmanın önüne geçmek amacıyla yapılan bu çalışmada, yıpranmaya neden olan faktörler tahmine dayalı analitik tekniklerinden biri olan makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Analiz için örnek veri seti IBM şirketi Watson Analytics programı kapsamında sunulan bir veri tabanından alınmıştır. Veri seti, 1470 adet çalışanın 30 farklı özneliğini içermektedir. Çalışmada, tahmin başarısını değerlendirmek amacıyla yedi farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır.

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): İrem ERSÖZ KAYA, iremer@tarsus.edu.tr

Yıpranmaya neden olan faktörlerin tespitinde ise kazanç oranı yaklaşımı tercih edilmiştir. Çalışmanın kilit noktası, bootstrap tekniği ile yeniden örnekleme yapılarak sınıfların örnek sayılarının dengelenmesidir. Sonuç olarak, yeniden örnekleme ile makine öğrenmesi yöntemlerinin anlamlı sonuçlar vermesi sağlanmış ve tahmin doğruluk performansı, kör test yapılmasına rağmen %80'ler seviyesine ulaşmıştır. Kazanç oranı ile yapılan öncelik sıralamasında ilk 20'de yer alan özelliğin, yıpranmaya neden olan öncelikli faktörler olabileceği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çalışan yıpranması, Tahmin analitikleri, Makine öğrenmesi, Öznitelik seçimi, Veri madenciliği

## 1. INTRODUCTION

Attrition in human resources represents the gradual loss of employees. Employee attrition is an undesirable condition for businesses due to the costs involved. Employee attrition is one of the most important problems affecting employees in the sector [1]. Continuous employee turnover prevents a collective database to be formed in the enterprise. Furthermore, it reduces customer satisfaction levels as the customers always communicate with new staff. On the other hand, this causes an undesirable condition for the enterprise because the employees that quit their jobs may take valuable information, which is a competitive advantage, with them [2]. Therefore, an enterprise must reduce employee attrition as much as possible to maintain its relative advantage. It is vital for an enterprise to find the reasons that cause employee attrition and prevent them [3]. However, employing intuitional methods to this end can be difficult and time-consuming for decision makers, since many factors, such as employees' demographic and working conditions, must be considered. The use of analytical approaches based on prediction can provide administrators with a general idea regarding employee resignation rates, thus ensuring optimal human resource planning [4]. By determining the factors that lead to attrition, administrators can reduce the risk of resignations and take action to preserve high-value talent.

Predictive analytics is a field of study in which data is analyzed using numerical methods, such as data mining, statistics, machine learning, and artificial intelligence, while also making estimations about future events [5]. These methods

are utilized in a number of sectors, including human resources, banking, e-commerce, retail, transportation, health and information technology [6]. This study will examine several examples of analytical methods based on prediction that are applied in the field of human resources. Factors that lead to attrition must be determined correctly and precautions must be taken to eliminate them in order to preserve valuable human resources. Numerous studies have already been carried out about the use of such analytical methods to determine the factors that contribute to employee attrition and estimating attrition rates.

In one such study, attrition trends were estimated using k-nearest neighbor and artificial neural network approaches by considering monthly working hours and the number of years spent at the company. The methods achieved prediction performances of 94.32% and 88.83%, respectively [7]. In another study, Alao and Adeyomo pre-classified the personnel in accordance with attrition groups [2]. This study used demographic information and work records of 109 employees who had resigned from a company operating in Nigeria to determine the factors that led to attrition. The authors developed a new predictive model for estimating these factors based on the results of rule clusters and decision tree models. This model applied the repeated incremental pruning technique, a machine learning method, resulting in a classification accuracy rate of 61%. Punnoose and Ajit also conducted a study that examined the problem of employee attrition with the use of machine learning methods. In that study, the naïve Bayes, random forest, support vector machines and k-nearest neighbor methods were used, yielding accuracy rates of 59%, 71%, 52% and 50% respectively [8].

In another study carried out to indicate that employee attrition represents a critical problem for enterprises (especially the resignation of key personnel), the decision tree, logistic regression, support vector machines, k-nearest neighbor, random forest, and naïve Bayes methods were applied to human resource data. Results were then analyzed by applying the feature selection method to the data. The analysis proved that machine learning methods can yield beneficial results in estimating employee attrition rates [9]. Çelik, meanwhile, compared the performance results of these methods by using data mining techniques to estimate attrition rates. A dataset, which was provided by IBM and included 35 different variables of 1,470 sample employees, was used in the study, which employed decision trees and support vector machines, yielding accuracy rates of 84.09% and 91.36% respectively [10].

The study is aimed at estimating employee attrition rates based on analytical approaches and determining the factors that lead to attrition. Results of this study demonstrate that resignation probabilities can be estimated using numerical methods in a rapid and successful manner, thus allowing decision makers to take precautions and reduce personnel turnover. The dataset, provided by IBM Watson, includes demographic features and information on the working conditions of 1,470 sample employees. Samples in the dataset include 30 different attributes classified in accordance with attrition conditions using the Support Vector Machine (SVM), Multilayer Perceptron (MLP), Radial Basis Function (RBF), Random Forest (RF), Bayes classifier (Bayes), k-Nearest Neighbor (kNN) and Repeated Incremental Pruning (JRip) algorithms. Sample numbers of the classes were equalized without changing the total sample number with the resampling method, bootstrapping that is a method used in data mining to balance datasets with a view to increasing success rates. This study focuses on effective factors in the prediction of employee attrition rates. For this purpose, factors sorted in terms of their effectiveness with the Gain Ratio (GR) approach were evaluated.

## 2. MATERIAL AND METHOD

A dataset including information on the demographic features and working conditions of 1,470 sample employees was used in this study with the aim of estimating employee attrition rates. This dataset, provided by IBM Watson, originally includes 34 different independent variables (attributes) as in categorical and continuous structure. However, since four of the attributes have the same values for all samples, they were extracted from the data set. These attributes constitute the independent variables of the data, while dependent variables represent employee attrition with binary classification.

Attributes of the data have values with different scales and codes in accordance with their features. It is a known fact that an attribute with high values hinders the prediction performance of machine learning methods due to suppressing the goal [11]. Therefore, in data mining studies, standardization is sought by pre-processing data using different methods. In the study, min-max normalization was used for data scaling (Equation 1). The technique has been preferred due to the fact that it yields successful results in machine learning methods [12,13].

$$x_{norm} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

In Equation 1,  $x_{norm}$ , represents the normalized value of  $x_i$  data, while  $min$  and  $max$  indexes represent the lowest and the highest value in data, respectively.

Data may also have an imbalanced class distribution, which can lead to bias in machine learning applications and prevent systems from functioning properly. Therefore, this study used bootstrapping to increase the number of samples in the smaller group. Meanwhile, synthetic data production was not preferred in this study due to the fact that the attributes of the dataset have different structural properties, e.g. some of them have a categorical structure. In synthetic data production, new samples produced by statistical

approaches or according to the values of neighboring samples may result in a value which does not exist among the current categories of the attribute. Therefore, sampling with a replacement was used while balancing the number of groups in order to preserve the general features of the data.

Two different applications were used in this study. In the first stage, sampled and non-sampled datasets were classified with algorithms using machine learning methods, such as the SVM, MLP, RBF, RF, Bayes, kNN and JRip. In the second stage, feature selection was carried out to determine the factors that lead to employee attrition. For this purpose, the attributes was ranked by Gain Ratio approach and the effect of these attributes were evaluated considering the success of machine learning methods.

In the applications, the data was divided into two sets in which two thirds was allocated for training and one third was reserved for testing. The training set was tested by applying 10-fold cross validation, while blind testing classification was executed with the test set. The group distributions of the datasets are given in Table 1.

**Table 1.** Class distribution of the datasets

Class	Cross Validation	Blind Testing
Attrition	163	74
Non-attrition	817	416
Total	980	490

The class distribution of the test set was preserved for blind testing, which was carried out to ensure the real success of the system. No resampling was employed for the blind testing dataset.

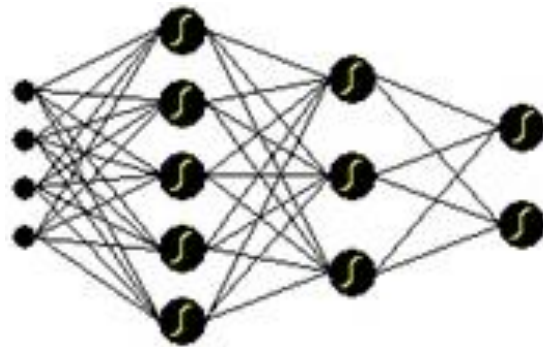
## 2.1. Classification Methods

Seven well-known machine learning approaches were employed for the classification in the application phase of the study. The MLP model of artificial neural networks, the Gaussian RBF network, the non-linear SVMs, the Bayesian network, the RF, the kNN and the JRip algorithms were all used in this study due to their different structural properties. All methods were

implemented with the Weka software (version 3.8) by using the default parameters for each classifier, provided by the tool.

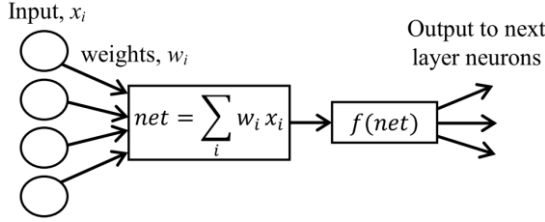
### 2.1.1. Multilayer Perceptron Neural Networks

Artificial neural networks, proposed in inspiration by the human mind and the biological neural system, represent one of the oldest and most widespread machine learning methods – one which has the ability to learn with the input data. An artificial network has a structure with three or more layers and interconnected processing units (artificial neurons) connecting the consecutive layers. Each connection in the network is associated with a numerical weight. An artificial neural network in a four-layer structure is shown in Figure 1. In artificial neural networks, intermediate layers are as hidden layers.



**Figure 1.** A simple four-layer artificial neural network

In a multilayer feed-forward neural network (multilayer perceptron), which is one of the artificial neural network models, input samples from the previous neurons are processed by calculating their weighted sum ( $net$ ) and are transmitted to the next layer as an input via an activation function as  $f(net)$  (Figure 2). Non-linear functions, such as sigmoid or hyperbolic tangents, are used as activation functions [14]. In the last layer (the output layer), the number of neurons are equal to the dimension of the output vector and an output value ( $\hat{y}$ ) is formed for the processed information from the previous layers.



**Figure 2.** The general model of learning in ANN

The weights ( $w$ ) are updated until the error arising from the difference between the real output values ( $y$ ) and estimated output values ( $\hat{y}$ ) reaches minimum [15]. This iterative modification, also known as the training process of the system, characterizes the learning ability of the artificial network. For each input sample given with  $y \in R^s$  output vector, the error function ( $J$ ) at each iteration ( $t$ ) is formulated as;

$$J(w) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^s (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (2)$$

The most common algorithm used for MLP training is the backpropagation algorithm. In the algorithm, the error function is minimized by updating the weight of the layers with a gradient descent approach (Equation 3).

$$w_{kj}^{t+1} = w_{kj}^t - \eta \frac{\partial J}{\partial w_{kj}^t} \quad (3)$$

where,  $\eta$  represents the learning speed, while  $w_{kj}$  represents the weight that connects the  $k$ . neuron of the layer to the  $j$ . neuron of the previous layer.

### 2.1.2. Radial Basis Function Networks

RBF networks are a type of feed-forward artificial neural networks. Its difference from the MLP lies in the fact that the radial basis activation functions are used in the hidden layer and a non-linear cluster analysis is conducted on the direct inputs of the input layer [16]. Therefore, the hidden layer is the most important component of the network.

Each neuron in the hidden layer represents a center and a radial basis function form of the distance

between the input samples, and these centers constitute the activation function ( $\phi$ ). The measure of the distance of the input vector to the centers is mostly calculated with the Euclidian norm ( $\|\cdot\|_2$ ). A Gauss function is commonly preferred in the literature as an activation function, given in Equation 4 [17].

$$\phi(x, c_j) = \exp\left(-\frac{\left(\|x - c_j\|_2\right)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

where,  $x$  represents the input vector of the network,  $\sigma$  the width parameter and  $c_j$  the radial basis centers. Various methods are proposed in the literature for the selection of the center vectors, like selecting the center vectors among the samples, allocating each sample as the center vector or determining the center vectors by unsupervised learning methods, such as k-means and self-organizing maps [18].

Net values, calculated by using the weights between two layers and the function outputs of the hidden layer, give the output values as the learning model as shown in Figure 2. Thereby, the output ( $\hat{y}_k$ ) of an RBF network that has a hidden layer with  $N$  neuron is found by;

$$\hat{y}_k = \sum_{j=1}^N w_{kj} \phi_j(x, c_j) \quad (5)$$

where,  $w_{kj}$  represents the weight that connects the  $k$ . neuron of the layer to the  $j$ . neuron of the hidden layer.

### 2.1.3. Support Vector Machines

SVM is a machine learning algorithm which aims to find the hyperplane with the maximum distance to two classes [19]. This hyperplane (decision boundary) is defined by  $\langle w, x_i \rangle + b = 0$  in a linearly separable sample space that consists of  $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$  data pair, which includes the  $x_i \in R^d$  input vectors and the class values  $y_i \in \{+1, -1\}$  of the samples. In this equation,  $b$  is the bias value and  $w$  is the weight vector (normal



for the hyperplane). The boundary points of two classes that are at the maximum distance to the hyperplane are referred to as support vectors (Figure 3). The margin between the parallel boundaries formed by the support vectors is defined by  $2/\|w\|$ . In this regard, the most proper

hyperplane is obtained by maximizing the margin between the boundaries subject to the linear constraints of  $y_i(\langle w, x_i \rangle + b) \geq 1$  [20].

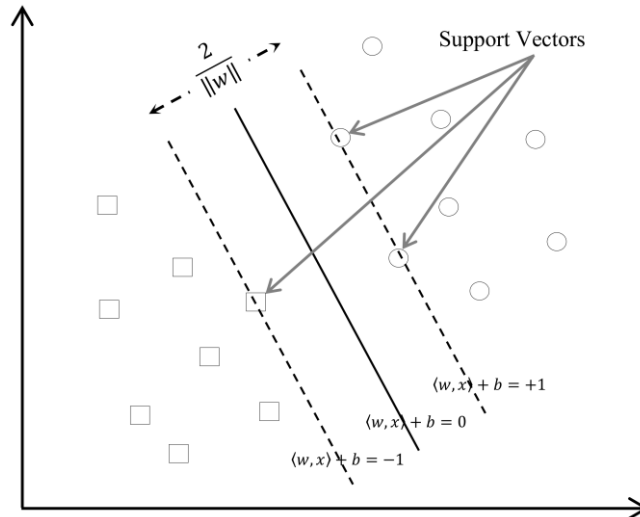


Figure 3. Decision boundary and support vectors of SVM

In real-world situations, datasets mostly contain outlier observations that cause noise. Constraints are released with a soft-margin approach that is used for outlier points in the created margin or on the wrong side of the margin [21]. According to this, an optimal hyperplane with the largest margin is achieved by minimizing the objective function within the constraints of  $y_i(\langle w, x_i \rangle + b) \geq 1 - \xi_i$  and  $\xi_i > 0$  (Equation 6).

$$\min_{w,b} \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \right\} \quad (6)$$

where,  $\xi_i$  represents the outlier variables used for calculating the error at the  $(x_i, y_i)$  point, while  $C$  represents the correction parameter that controls the balance between the margin maximization and error minimization. The quadratic optimization problem represented in Equation 6 is transformed into a dual form via Lagrange multipliers technique. Subsequently, it is simplified by using Karush-Kuhn-Tracker conditions [22]. The

objective function transformed into dual form is defined in Equation 7.

$$\max_{a,w,b} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle \right\} \quad (7)$$

where,  $\alpha_i$  represents the Lagrange multipliers and is defined at the  $0 \leq \alpha_i \leq C$  interval. Furthermore, according to Karush-Kuhn-Tracker condition, there is a constraint for Equation 7 given by  $\sum_{i=1}^n y_i \alpha_i = 0$ . In the course of solving the problem, many  $\alpha_i$  take the values of zero, while all training samples of  $\alpha_i > 0$  are defined as support vectors (Sv). According to this, the weight vector ( $w^*$ ) for the best solution can be given as follows;

$$w^* = \sum_{i \in Dv} \alpha_i y_i x_i \quad (8)$$

In cases where the data cannot be linearly separated, SVM changes the data into a linearly-separable form by carrying the input space to a

higher dimensional space with the help of the kernel function,  $K(x_i, x) = \phi(x_i) \cdot \phi(x)$ . The decision function obtained by using the solution of the objective function, along with the kernel trick, is shown in Equation 9.

$$f(x) = \text{sgn}(y_i \alpha_i K(x_i, x) + b) \quad (9)$$

The classification for each  $x$  value is conducted via calculating the kernel function of  $x$ . One of the most commonly used and successful kernel functions is the RBF kernel [23].

#### 2.1.4. Random Forest

Random Forest is an ensemble-learning algorithm that has decision trees at its basis. In the ensemble-learning approach, a single prediction model is created by gathering more than one classifier. The classifiers used in the RF are decision trees. These decision trees combine and form the decision forest [24].

In the RF approach,  $N$  number of sub-sample data is created by using a bootstrap technique to grow each tree in the forest. Two thirds of each sample is used to create training data (in-bag), which is needed to create the model. The remaining third is then used to create a test set (out-of-bag/OOB), which is used to measure the model's performance. Then, an unpruned classification or regression tree is created for the in-bag dataset of each sub-sample data by using the CART algorithm [25]. For this,  $m$  number of random variables ( $m < p$ ) is selected out of all variables ( $p$ ) at each node. The most suitable one for branching out is determined with information gain. The best cut-off value for the variable is calculated using the Gini index, and each node is split into two sub-branches (Equation 10). All these processes are conducted for all nodes until a leaf node is achieved.

$$\sum_{j \neq i} (f(S_i, T) / |T|) (f(S_j, T) / |T|) \quad (10)$$

where,  $T$  represents the training dataset,  $S$  is the class of the randomly selected sample and

$(f(S_i, T) / |T|)$  gives the probability of the selected sample belonging to class  $S_i$ .

At the end of the training, each branch of the tree represent the parameters of the split function determined in accordance with the  $x$  input vector, while each leaf gives the distribution of the  $y$  output variable. In RF, the independence of each tree is ensured by randomly choosing a subset from the training data. In the testing stage, each sample of the OOB data goes through each tree with respect to the split function and classified. According to the classification results, an OOB error rate is calculated for each tree in the forest, and then each tree is endowed with an inversely proportional weight in accordance with this error rate [26]. Each decision tree votes in compliance with its weight for the classification of each sample in the dataset. All the prediction values (votes) of the trees are gathered and the class that gets the most votes is assigned to that sample.

#### 2.1.5. Bayes Networks

The Bayes network is a machine learning method that presents variables and the probabilistic relationships of the variables with a directed acyclic graph (DAG). The Bayes network is considered as one of the strongest methods of interpretation and inference, due to its ability to graphically depict the complex relations between variables while also numerically representing them [27].

A Bayes network contains many nodes and edges (arrows) that connect these nodes according to their probabilistic relationships. In the network, the nodes with arrows directed towards them are called child nodes, while nodes with arrows directed away from them are called parent nodes. Nodes without children are leaf nodes and nodes without parents are root nodes. Each node in the network corresponds to a random variable (attribute) and is associated with a conditional probability distribution of the random variables given as its parents. The directed edges between the nodes represents a probabilistic dependency between the variables. The variables without

parents have a marginal probability distribution. A Bayes network sample with five variables is shown in Figure 4.

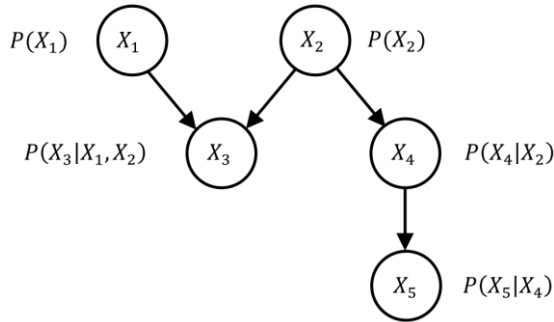


Figure 4. The sample of a Bayesian network

Any variable in a Bayes network is independent of all variables except its descendants, given its parents [28]. Thus, the joint probability distribution in a Bayes network is derived by the chain rule;

$$P(X_1, \dots, X_d) = \prod_{i=1}^d P(X_i | \text{beveyn}(X_i)) \quad (11)$$

where,  $d$  represents the number of variables in the network, while  $X_i$  represents the random variables.

Learning in Bayes networks is conducted with the prediction of the graphical structure of the network and the parameters of the joint probability distributions. The process of determining the structure of the network, which is defined as structural learning, includes the identification of the variables and their relationships within the model. Predictions can be performed by proper inferences considering the optimum parameters and the network structure, which are constructed as a result of the learning process carried out with many different algorithms [29].

### 2.1.6. k-Nearest Neighbor

First introduced by Fix and Hodges in 1951, the ‘nearest neighbor’ approach is one of the simplest and oldest machine learning techniques that depends on linear supervised pattern recognition [30]. In this technique, the model is fed with a

training set, and this training set is used to classify objects. According to this, an unknown sample of the prediction set is classified pursuant to the majority class of its  $k$  nearest neighbor. The value of  $k$  has a great effect on the accuracy of kNN, and the optimum value of the parameter can be found by using cross-validation during the adjustment of the model [31].

### 2.1.7. Repeated Incremental Pruning

JRip, a rule based machine learning method, was proposed by Cohen as an optimized version of the IREP learning algorithm [32]. JRip applies the Repeated Incremental Pruning to Produce Error Reduction (RIPPER) technique which is a rule learning in Java. The algorithm is based on the creation of a rule set that includes all positive samples. In the algorithm, decision rules are created in the form of IF-THEN statements for each class of the training set and then pruned [33].

JRIP, initially, partitions the samples of the training set into two subsets as growing and pruning. Later, an initial rule set is produced from the samples of the growing set using heuristic methods. The overgrown rule set is then repeatedly simplified by pruning any single condition or any single rule. At each stage of the simplification, the pruning which provides the greatest reduction in error in the pruning set is performed. The simplification ends when the error starts to increase.

A rule set starts as an empty set and the rules are gradually added to the rule set until the total description length of the new rule set is  $d$  bits larger than the smallest description length of the previous rule set or there are no positive examples left [34]. A rule is grown by adding conditions to the rule until none of the negative samples are covered i.e. until it achieves 100% accuracy. During the growing process, all the values of each attribute are tested and the condition that has the highest information gain is selected. In the sequel, JRip pruning either changes the place of the individual conditions or reorganizes them with reduced error pruning, in order to increase the accuracy of the rules [33].

## 2.2. Feature Selection

The Gain Ratio (GR) approach, used for ranking attributes according to priorities in data mining, was employed in feature selection. The GR approach is widely used due to its suitability for datasets with multi-valued attributes which have many probable values [35]. It is an improved extension of the information gain measure.

Information gain is a measure that gives the amount of knowledge gained about a random variable ( $Y$ ) from another random variable ( $X$ ) by using the entropy model [36]. Entropy ( $H$ ) is defined as the measure of a system's unpredictability (Equation 12).

$$H(Y) = -\sum_{y \in Y} p(y) \log_2(p(y)) \quad (12)$$

The conditional entropy of  $Y$  given the value of attribute  $X$  is shown as;

$$H(Y \setminus X) = -\sum_{x \in X} p(x) \sum_{y \in Y} p(y \setminus x) \log_2(p(y \setminus x)) \quad (13)$$

With reference to Equation 13, the information gain and the GR are given in Equations 14 and 15, respectively.

$$\text{Information Gain} = H(Y) - H(Y \setminus X) \quad (14)$$

$$\text{GR} = \frac{\text{Information Gain}}{H(X)} \quad (15)$$

For the feature selection phase of the study, three new datasets were created by selecting the first 20, 15 and 10 attributes ranked with GR. The machine learning methods were then reapplied to the reorganized datasets with the selected attributes.

## 2.3. Performance Assessment

Estimating employee attrition is a binary-classification problem, and there are plenty of measures that have been used to assess the

performance of predictive models in such problems. The widely preferred measures to quantify the prediction power of the methods can be given as sensitivity ( $Sens$ ), specificity ( $Spec$ ), accuracy ( $Acc$ ), receiver operating characteristic (ROC), and area under ROC curve (AUC) values. The AUC value is the area underneath the ROC curve, in which the sensitivity (true positive rate) is plotted in function of 1-Specificity (false positive rate) for different threshold points of a parameter.  $Acc$ ,  $Sens$  and  $Spec$  indices are defined by the following equations;

$$\text{Accuracy}(Acc) = \frac{TP + FN}{TP + FP + TN + FN} \quad (16)$$

$$\text{Sensitivity}(Sens) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (17)$$

$$\text{Specificity}(Spec) = \frac{TN}{TN + FP} \quad (18)$$

where  $TP$  (true positive) is the number of correctly classified positives;  $TN$  (true negative) is the number of correctly classified negatives;  $FP$  (false positive) is the number of incorrectly classified positives; and  $FN$  (false negative) is the number of incorrectly classified negatives. Accordingly, sensitivity and specificity represent the fraction of correctly identified samples as attrition and non-attrition, respectively. Since all three measures are critically affected by the relative frequency of the target, they are not suitable for the isolated evaluation [37]. A sensitivity of less than 50% but a specificity of more than 80% demonstrates an under-prediction of a predictor which has the tendency of predicting non-attrition more than attrition. Furthermore, the AUC is also biased towards negative examples when data are imbalanced with few positives relative to negatives [38].

When the properties of the traditional measures are considered, an unbiased measure is required for evaluating an imbalanced data. Therefore, probability excess ( $ProbEx$ ) was proposed as an

unbiased measure for evaluating the performance of prediction by Yang et al. [39]. Probability excess is independent of the relative class frequencies by means of the evaluation of sensitivity and specificity values in cooperatively with sensitivity + specificity - 1, that can be graphed by a plot of sensitivity versus specificity. It is defined by the following equation;

$$Probability\ Excess(ProbEx) = \frac{TP \times TN - FP \times FN}{(TP + FN) \times (TN + FP)} \quad (19)$$

The values of greater than 0.5 reveal an acceptable prediction performance in probability excess criteria. Here the value of 1 is also an indicator of a perfect predictor.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, employee attrition was intended to predict considering several factors and the factors that are effective in the attrition were evaluated. For this purpose, a dataset which was provided by IBM including 30 attributes relating to the demographic and working conditions of 1,470 employees was used in the study. In the research, employee attrition was evaluated based on the prediction results which was obtained by applying seven different machine learning algorithms to the dataset. To this end, firstly, the dataset was partitioned into two parts as training and testing. Next, 10-fold cross validation was applied to training dataset to evaluate the prediction performances. Finally, blind testing was executed in order to validate the reliability of the prediction success of the methods.

The implementation phase of the study was carried out in two parts. In the first part, prediction performances of the methods were obtained as a result of the applications executed with sampled and non-sampled datasets. In the second part, feature selection was performed with the sampled dataset. At this stage, the factors provoking employee attrition were evaluated in terms of their effects on the prediction success.

#### 3.1. Estimating Employee Attrition

In the application phase of the study, the raw state of the normalized data was used. The prediction performance of the machine learning methods was appraised by the average results of the 10-fold cross validation applied to the training set, and later attested with blind testing. The results obtained from the applications with the raw data are presented in Table 2.

**Table 2.** The prediction performance results for the raw training dataset

Method	Cross Validation				Blind Testing			
	Sens	Spec	Acc	AUC	Sens	Spec	Acc	AUC
SVM	0.33	0.98	0.87	0.66	0.37	0.98	0.88	0.67
MLP	0.42	0.91	0.83	0.77	0.51	0.94	0.87	0.80
RBF	0.36	0.96	0.86	0.84	0.38	0.97	0.88	0.80
RF	0.14	0.99	0.85	0.79	0.20	0.99	0.87	0.81
Bayes	0.42	0.88	0.80	0.74	0.40	0.91	0.83	0.74
kNN	0.35	0.91	0.82	0.63	0.30	0.87	0.79	0.59
JRip	0.26	0.94	0.82	0.61	0.28	0.95	0.85	0.62

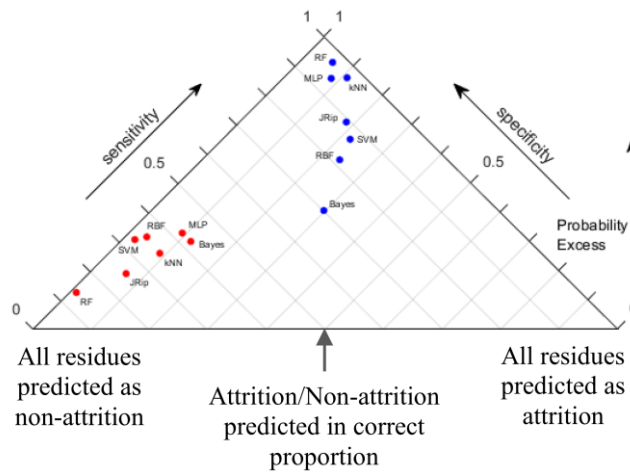
When the results reported in Table 2 are examined, it can be seen that the *Sens* value is too low for all methods, and the values reveal that employee attrition was not successfully predicted. On the other hand, the classification accuracy of non-attrition state was reached over 90%. The situation is called as the tendency of predicting non-attrition i.e. *under-prediction*. The distribution of the *probEx* values which are represented by red dots on the triangular graph given in Figure 5 and Figure 6 also show this situation. All of the red dots are found on the left-hand side of both graphs. This is due to the fact that the samples of attrition are rather few compared to the other class. As is known, imbalanced distribution of data results in bias during the systems' learning.

In the second part of the machine learning applications, the runs were repeated on a recreated training dataset in which the samples of the rare class were increased via bootstrapping while the blind testing data was preserved unchanged to ensure the correct comparisons of the reliability of the methods. The results are provided in Table 3.

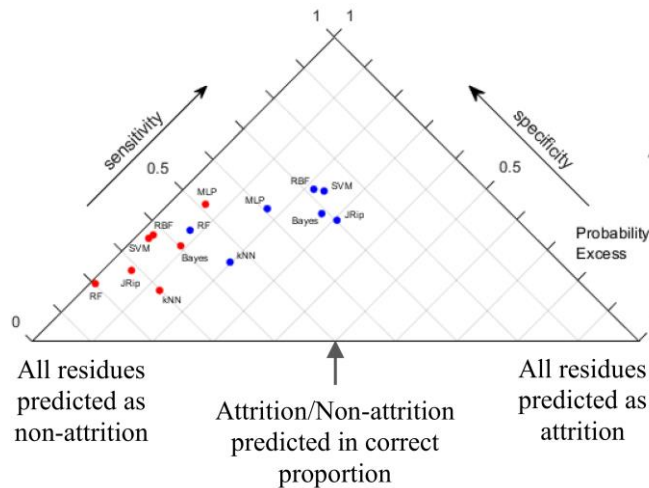
**Table 3.** The prediction performance results for the resampled training dataset

Method	Cross Validation				Blind Testing			
	Sens	Spec	Acc	AUC	Sens	Spec	Acc	AUC
SVM	0.87	0.78	0.82	0.82	0.73	0.76	0.76	0.75
MLP	0.94	0.92	0.93	0.93	0.61	0.83	0.80	0.77
RBF	0.82	0.76	0.79	0.87	0.72	0.78	0.77	0.80
RF	0.97	0.94	0.96	0.99	0.45	0.92	0.85	0.79
Bayes	0.70	0.70	0.70	0.80	0.69	0.73	0.72	0.74
kNN	0.97	0.89	0.93	0.94	0.46	0.80	0.75	0.63
JRip	0.89	0.82	0.85	0.88	0.70	0.70	0.70	0.72

The results of both cross validation and blind testing show that elimination of the imbalance in data distribution by resampling led to a considerable increase in the success of attrition state prediction. The *probEx* values of the resampled data (blue dots) shown in both Figure 5 and Figure 6 verify the argument as well.



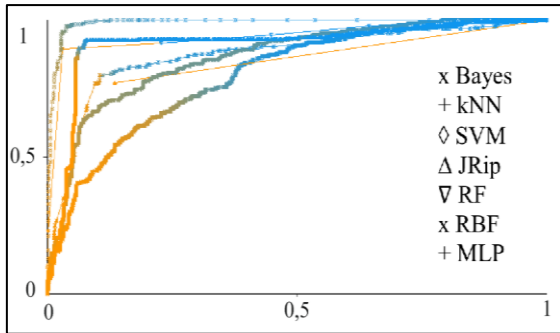
**Figure 5.** The cross validation performance of the seven methods on both raw data (red dots) and resampled data (blue dots)



**Figure 6.** The blind testing performance of the seven methods on both raw data (red dots) and resampled data (blue dots)

Especially, in Figure 5 which shows the cross validation performance of the methods, it can be clearly seen that the blue dots are distributed over the middle of the pyramid. This is due to the fact that there is no great difference between the sensitivity and specificity. This indicates that a relatively balanced prediction accuracy has been achieved on the cross-validation of the methods.

When the success rates of the methods' blind testing are evaluated, it is also observed that the *Sens* value rise above 60% and more balanced estimates are obtained in all methods except RF and kNN (Figure 6). At this point, it was determined that the *Sens* value of the RF method, which has the highest *Acc* value at 85%, stayed below 50%, thus failing to achieve a significant estimation. The RBF and SVM are especially notable in terms of their balanced prediction performances among all the methods. With the purpose of comparing the performance of the seven machine learning methods in blind testing, the ROC curve shown in Figure 7 was plotted. When the curves in the figure are examined, it can be seen that the RBF method has the highest prediction success. The lowest prediction success was obtained by using the kNN method.



**Figure 7.** ROC curve for blind testing performance of the seven methods on resampled data

Considering the similar prior studies, it is observed that the prediction performance of machine learning methods attains an accuracy of 95% [7, 10]. Similarly, in this study, the classification performance achieved with 96% accuracy rate. Moreover, it is of great importance to perform both

a cross validation and blind testing to ensure reliability of the prediction results. *Acc* results of up to 88% were achieved in accordance with blind testing, which was carried out to measure real success. However, *Sens* and *Spec* values must also be considered in the evaluation process. In order to make a meaningful interpretation on the prediction performance of the methods, these values should be relatively close each other and over 50%. Therefore, in the study, the sample number of the rare class was increased by resampling in order to provide a significant improvement in prediction success. Thereby, successful results reaching up to 80% were achieved in robust specificity without sacrificing sensitivity.

### 3.2. Determining Employee Attrition Factors

In the feature selection phase of the study, the training and testing data were rearranged by selecting the first 20, 15 and 10 attributes, respectively, ranked according to their discrimination capability with the GR approach. At this stage, the resampled dataset which has a balanced class distribution was used since it enables to obtain significant results. The machine learning methods were reapplied to the arranged datasets with respect to the selected attributes in order to investigate the factors that cause employee attrition.

The first 20 attributes ranked by GR and taken into account for the evaluation are as follows: monthly income, job level, total working years, overtime, stock option level, age, years with current manager, job involvement, marital status, job role, years at company, years in current role, education field, work life balance, environment satisfaction, job satisfaction, business travel, distance from home, years since last promotion, and department. Application results for the first 20, 15 and 10 attributes are given in Tables 4, 5 and 6, respectively.

In the light of the results provided in the Table 4, it can be said that the prediction accuracy of the methods was preserved in general, while the *Sens* values of the methods were increased at least 1% except for MLP and Bayes (Table 4).



Consequently, the balanced prediction results of above 70% were achieved.

**Table 4.** The prediction performance results for the datasets arranged with the first 20 attributes

Method	Cross Validation				Blind Testing			
	Sens	Spec	Acc	AUC	Sens	Spec	Acc	AUC
SVM	0.86	0.76	0.81	0.81	0.74	0.74	0.74	0.74
MLP	0.93	0.88	0.91	0.92	0.61	0.78	0.76	0.76
RBF	0.84	0.77	0.80	0.86	0.73	0.76	0.75	0.80
RF	0.97	0.93	0.95	0.99	0.50	0.91	0.85	0.81
Bayes	0.70	0.70	0.70	0.80	0.69	0.73	0.72	0.74
kNN	0.96	0.90	0.93	0.93	0.47	0.80	0.76	0.64
JRip	0.90	0.79	0.84	0.87	0.73	0.69	0.70	0.74

For the first 15 attributes with the highest GR, similar to the first 20 attributes, the prediction accuracy of the methods was preserved, however there is a slight decrease in *Sens* values (Table 5).

**Table 5.** The prediction performance results for the datasets arranged with the first 15 attributes

Method	Cross Validation				Blind Testing			
	Sens	Spec	Acc	AUC	Sens	Spec	Acc	AUC
SVM	0.78	0.78	0.78	0.78	0.73	0.77	0.77	0.75
MLP	0.94	0.86	0.90	0.90	0.60	0.73	0.71	0.72
RBF	0.79	0.77	0.78	0.85	0.73	0.78	0.77	0.78
RF	0.97	0.91	0.94	0.99	0.47	0.91	0.84	0.79
Bayes	0.70	0.71	0.70	0.80	0.68	0.73	0.72	0.74
kNN	0.97	0.90	0.93	0.94	0.42	0.82	0.76	0.61
JRip	0.87	0.79	0.83	0.87	0.68	0.74	0.73	0.72

Results of the application on the first 10 attributes are provided in Table 6, where it is observed that the prediction accuracy of employee attrition was significantly decreased according to the situation in which no attribute was selected.

**Table 6.** The prediction performance results for the datasets arranged with the first 10 attributes

Method	Cross Validation				Blind Testing			
	Sens	Spec	Acc	AUC	Sens	Spec	Acc	AUC
SVM	0.72	0.81	0.77	0.77	0.609	0.79	0.76	0.69
MLP	0.83	0.81	0.82	0.85	0.61	0.79	0.76	0.72
RBF	0.75	0.77	0.76	0.82	0.70	0.76	0.75	0.77
RF	0.97	0.90	0.94	0.98	0.41	0.88	0.81	0.74
Bayes	0.74	0.71	0.72	0.79	0.65	0.73	0.72	0.74
kNN	0.46	0.81	0.75	0.64	0.465	0.81	0.75	0.64
JRip	0.83	0.76	0.79	0.81	0.53	0.82	0.78	0.68

When the results are evaluated in general, it can be interpreted that the first 20 attributes have adequate explanatory power in predicting the attrition since the accuracy results of the methods obtained with these attributes did not change compared to those obtained without the selection of the attributes, and even the prediction success of the class which has the small sample size has increased. On the other hand, when the attribute number was reduced to 15, a slight decrease in success values is observed. Accordingly, it is possible to say that the five extracted features or some of these are among the factors affecting attrition.

When similar previous studies investigating factors affecting employee attrition are examined, the attributes similar to those found in this study become prevalent. For example, in a study conducted by Alduayj and Rajpoot, the most influential factors in terms of attrition are sorted as marital status, years with current manager, stock option level, business travel, job role, job involvement, job satisfaction and environment satisfaction [40]. In another study in which different machine learning methods were applied to the dataset provided by IBM Watson in order to predict employee attrition, it is found that job role is among the dominant factors causing attrition [41]. In yet another study using machine learning techniques, the data collected from an insurance company was evaluated and an attribute selection method was applied to these data, which are grouped in three categories: customer, product and vehicle. In customer category, age and gender were determined to be among the effective factors [42]. In a similar study carried out with machine learning methods, the five most affecting factors on attrition were reported as overtime, monthly income, daily rate, age, and total working years [43].

#### 4. CONCLUSION

Employee attrition is an important problem in today's business world. Because the personnel turnover rate in enterprises is increasing as a natural result of attrition. The leaving of such personnel, who have been recruited as a result of a great deal of endeavor and effort, causes the loss of

cost and time for enterprises. In addition, employee attrition negatively affects the career success of managers and leads to an increase in the number of occupational accidents caused by recruited personnel. Therefore, it is very important to predict attrition. Estimating the number of personnel to leave the job, which will occur as a natural consequence of attrition will help managers to make human resource planning more accurately. As managers make the human resources planning more accurately, the businesses will become sustainable and gain a competitive advantage. It is a difficult and laborious process to determine attrition through traditional research techniques. In addition, the estimation performance can be low as it is an evaluation with multiple factors. Therefore, in the study, attrition and the factors that cause attrition were intended to be determined by using predictive analytical approaches. For this purpose, seven different machine learning methods were applied to the IBM Watson dataset containing the demographic characteristics and working conditions of 1470 employees and the predictive success of the methods were evaluated by comparing the results. Additionally, in order to increase the predictive performance of the methods, the class distribution in the dataset was balanced with resampling by using the technique of bootstrapping and the results were compared by repeating the applications. Using the resampling technique, the predictive success of the attrition class which is less in the dataset was increased and thus, in the blind test, balanced prediction performances were obtained with an accuracy level of 80%. Among the methods used, the most successful ones were found to be RBF and SVM in terms of balanced Sens and Spec values and high success rates.

Later in the study, 30 features were ranked in terms of explanatory power using the gain ratio approach, and the application results obtained with the first 20, 15, and 10 features were interpreted to determine the factors that affect attrition. Based on the prediction results, it was concluded that the first 20 factors were sufficient in explaining attrition. It was inferred that the determined factors show similarities to those found in the studies in the literature. In addition, despite blind testing was

used in the study, comparatively more robust results were obtained with high prediction accuracy rates and balanced prediction performances.

The difficulty of analyzing and interpreting big data by end users, here managers, who lack technical knowledge, raises the need to design systems that allow clear and understandable interpretation of the data rather than expressing it in numbers. As a future work, a system comprising of a combinatorial machine learning approach in which several feature selection algorithms are hierarchically included, could provide an increase in success for determining the factors leading attrition. Such a system that performs forecasting with the successful machine learning methods having preprocessed the data with bootstrapping in the case of imbalanced distribution and determines important factors by the feature selection methods found by trying out different algorithms, would provide support to human resources managers in decision-making processes.

As a conclusion, it was shown that it is possible to use machine learning techniques as a business analytics, successfully. The study will benefit the management and production of new generation human resource policies in terms of predicting employee attrition more accurately and more easily, as well as providing information to help reduce the staff turnover rate as a result of taking measures to eliminate the factors causing attrition by identifying them.

## **5. REFERENCES**

1. Sridhar, G.V., Vetrivel, S., Venugopal, S., 2018. Employee Attrition and Employee Retention-challenges & Suggestions. 2018 International Conference on Economic Transformation with Inclusive Growth-2018, Chennai, India, 1-16.
2. Alao, D., Adeyemo, A.B., 2013. Analyzing Employee Attrition Using Decision Tree Algorithms. *Computing, Information Systems & Development Informatics Journal*, 4(1), 17-28.

3. Srivastava, D.K., Nair, P., 2017. Employee Attrition Analysis Using Predictive Techniques. 2017 International Conference on Information and Communication Technology for Intelligent Systems, Ahmedabad, India, 293-300.
4. Raman, R., Bhattacharya, S., Pramod, D., 2019. Predict Employee Attrition by Using Predictive Analytics. Benchmarking: An International Journal, 26(1), 2-18.
5. Gandomi, A., Haider, M., 2015. Beyond the Hype: Big Data Concepts, Methods and Analytics. International Journal of Information Management, 35(2), 137-144.
6. Zhao, W., Pu, S., Jiang, D., 2020. A Human Resource Allocation Method for Business Processes Using Team Faultlines. Applied Intelligence, 50, 2887-2900.
7. Yedida, R., Reddy, R., Vahi, R., Jana, R.J., Gv, A., Kulkarni, D., 2018. Employee Attrition Prediction, arXiv:1806.10480, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1806/1806.10480.pdf>
8. Punnoose, R., Ajit, P., 2016. Prediction of Employee Turnover in Organizations Using Machine Learning Algorithms. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 5(9), 22-26.
9. Shankar, R.S., Rajanikanth, J., Sivaramaraju, V.V., Murthy, K.VSSR., 2018. Prediction of Employee Attrition Using Datamining. 2018 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN), Pondicherry, India, 335-342.
10. Çelik, U., 2019. Estimation of Employee Attrition in Business Life Balance with Data Mining Methods. Journal of Management and Economics Research, 17(1), 63-76.
11. Sevilla, J., 1997. Importance of Input Data Normalization for the Application of Neural Networks to Complex Industrial Problems. IEEE Transactions on Nuclear Science, 44(3), 1464 – 1468.
12. Zhang, Y-P., Qiqige, W., Zheng, W., Liu, S., Zhao, C., 2016. gDNA-Prot: Predict DNA-Binding Proteins by Employing Support Vector Machine and a Novel Numerical Characterization of Protein Sequence. Journal of Theoretical Biology, 406, 8-16.
13. Christo, V.R.E., Nehemiah, H.K., Minu, B., Kannan, A., 2019. Correlation-based Ensemble Feature Selection Using Bioinspired Algorithms and Classification Using Backpropagation Neural Network. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 7398307, 1-17.
14. Wang, Z., Fu, Y., Huang, T.S., 2019. Signal Processing. Deep Learning Through Sparse and Low-rank Modeling, San Diego, USA: Academic Press, 121-142.
15. Duda, R.O., Hart, P.E., Stork, D.G., 2000. Pattern Classification. John Wiley & Sons, New York, USA, 688.
16. Raitoharju, J., Kiranyaz, S., Gabbouj, M., 2016. Training Radial Basis Function Neural Networks for Classification via Class-specific Clustering. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 27(12), 2458-2471.
17. Schwenker, F., Kestler, H.A., Palm, G., 2001. Three Learning Phases for Radial-basis-function Networks. Neural Networks, 14, 439-458.
18. Faris, H., Aljarah, I., Mirjalili, S., 2017. Evolving Radial Basis Function Networks Using Moth-flame Optimizer. Samui, P., Sekhar, S., Balas, V.E., (Ed.), Handbook of Neural Computation, San Diego, USA: Academic Press, 537-550.
19. Cortes, C., Vapnik, V., 1995. Support-Vector Networks. Machine Learning, 20, 273-297.
20. Battineni, G., Chintalapudi, N., Amenta, F., 2019. Machine Learning in Medicine: Performance Calculation of Dementia Prediction by Support Vector Machines (SVM). Informatics in Medicine Unlocked, 16:100200, 1-8.
21. Awad, M., Khanna, R., 2015. Support Vector Machines for Classification. Awad, M., Khanna, R., (Ed.). Efficient Learning Machines, Berkeley, CA: Apress, 39-66.
22. İbrikçi, T., Üstün, D., Ersöz Kaya, I., 2012. Diagnosis of Several Diseases by Using Combined Kernels with Support Vector Machine. Journal of Medical Systems, 36(3), 1831-1840.
23. Öztürk, G., Çimen, E., 2019. Polyhedral Conic Kernel-like Functions for SVMs, Turkish

- Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 27, 1172-1180.
24. Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
  25. Pal, M., 2005. Random Forest Classifier for Remote Sensing Classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 217-222.
  26. Winham, S.J., Freimuth, R.R., Biernacka, J.M., 2013. A Weighted Random Forests Approach to Improve Predictive Performance. *Statistical Analysis and Data Mining*, 6(6), 496-505.
  27. Chan, A.P.C., Wong, F.K.W., Hon, C.K.H., Choi, T.N.Y., 2018. A Bayesian Network Model for Reducing Accident Rates of Electrical and Mechanical (E&M) Work. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11):2496, 1-19.
  28. Carson, E., Cobelli, C., 2014. *Modelling Methodology for Physiology and Medicine*. Elsevier, Waltham, USA, 588.
  29. Ruz, G.A., Araya-Diaz, P., 2018. Predicting Facial Biotypes Using Continuous Bayesian Network Classifiers. *Complexity*, (4075656), 1-14.
  30. Fix, E., Hodges, J.L., 1951. Discriminatory Analysis-nonparametric Discrimination: Consistency Properties. Project No. 2-49-004, Report No. 4, Contract No. AF 41(128)-31, USAF School of Aviation, Randolph Field, Texas.
  31. Lu, L., Zhu, Z., 2014. Prediction Model for Eating Property of Indica Rice. *Journal of Food Quality*, 37, 274-280.
  32. Cohen, W.W., 1995. Fast Effective Rule Induction. 1995 Twelfth International Conference on Machine Learning, California, 115-123.
  33. Rezapour, M., Zadeh, M.K., Sepehri, M.M., 2013. Implementation of Predictive Data Mining Techniques for Identifying Risk Factors of Early AVF Failure in Hemodialysis Patients. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2013 (Article ID: 830745), 1-8.
  34. Du, J., 2010. Iterative Optimization of Rule Sets, Master's Thesis. Technische Universitat Darmstadt, Fachbereich Informatik, Darmstadt, 72.
  35. Witten, I.H., Frank, E., 2005. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Elsevier Inc., San Francisco, USA, 525.
  36. Chen, J., Li, Q., Wang, H., Deng, M., 2020. A Machine Learning Ensemble Approach Based on Random Forest and Radial Basis Function Neural Network for Risk Evaluation of Regional Flood Disaster: A Case Study of the Yangtze River Delta. China, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(1), 49, 1-21.
  37. Kaya, I.E., Ibrikci, T., Ersoy, O.K., 2011. Prediction of Disorder with New Computational Tool: BVDEA. *Expert Systems with Applications*, 38, 14451-14459.
  38. Carrington, A.M., Fieguth, P.W., Qazi, H., Holzinger, A., Chen, H.H., Mayr, F., Manuel, D.G., 2020. A New Concordant Partial AUC and Partial C Statistics for Imbalanced Data in the Evaluation of Machine Learning Algorithms. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 20 (4), 1-12.
  39. Yang, Z.R., Thomson, R., McNeil, P., Esnouf, R.M., 2005. RONN: The Bio-Basis Function Neural Network Technique Applied to the Detection of Natively Disordered Regions in Proteins. *Bioinformatics*, 21, 3369-3376.
  40. Alduayj, S.S., Rajpoot, K., 2018. Predicting Employee Attrition Using Machine Learning. IIT 2018: 13<sup>th</sup> International Conference on Innovations in Information Technology, Al Ain, United Arab Emirates, 93-98.
  41. Bhuvra, K., Srivastava, K., 2018. Comparative Study of the Machine Learning Techniques for Predicting the Employee Attrition. *International Journal of Research and Analytical Reviews*, 5(3), 568-577.
  42. Paredes, M., 2018. A Case Study on Reducing Auto Insurance Attrition with Econometrics, Machine Learning, and A/B Testing. 2018 IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA), Turin, Italy, 410-414.
  43. Sukhadiya, J., Kapadia, H., D'silva, M., 2018. Employee Attrition Prediction Using Data Mining Techniques. *International Journal of Management, Technology And Engineering*, 8(X), 2882-2888.

## A Vector-Based Mapping in GIS Environment to Classify Local Climate Zone

Müge ÜNAL ÇİLEK\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-1147-9729

<sup>1</sup>Firat University, The Faculty of Architecture, Landscape Architecture Department, Adana

Geliş tarihi: 02.08.2021

Kabul tarihi: 11.10.2021

Atıf şekli/ How to cite: ÜNAL ÇİLEK, M., (2021). A Vector-Based Mapping in GIS Environment to Classify Local Climate Zone. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 929-940.

### Abstract

Local climate zones (LCZ), which are widely used in urban heat island studies, include climate-based classification of the city to determine the climatic differences in the metropolitan area. Therefore, mapping methods have been developed to visualise LCZ classes. Compared to the raster-based mapping method, the vector-based mapping method, which makes a more precise and accurate evaluation, is not widely used due to the difficulty in creating and obtaining a dataset. This study aims to implement a GIS-based approach in creating a vector-based LCZ map in the example of Adana City, Turkey. The method of the study consists of five steps: a) determination of classification criteria; b) mapping of each classification criteria via Arc-GIS; c) creation of the decision tree for the creation of the LCZ map; d) overlapping of the classification criteria in line with the decision tree; e) development of suggestions in line with the findings. Vector-based LCZ classification has minimised the classification mistakes that may arise from resolution and has enabled the creation of a highly accurate LCZ map. The LCZ map obtained from the study is expected to be a base map in studies on urban climate studies and to guide decision-makers.

**Keywords:** Vector-based, Local Climate Zone, Geographic Information System (GIS), Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)

### Yerel İklim Zonlarının CBS Ortamında Vektör-Tabanlı Haritalanması

#### Öz

Kentsel ısı adası çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Yerel İklim Zonları (YİZ) kentsel alanda iklimsel farklılıkların belirlenebilmesi için kentin iklim temelli sınıflanmasını içermektedir. Bu yüzden YİZ sınıflarını görselleştirilmesi için haritalama yöntemleri geliştirilmiştir. Manuel, raster ve vektör tabanlı olmak üzere üç tür haritalama yöntemi bulunmasına rağmen hassas ve doğru değerlendirme yapan vektör tabanlı yöntem yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu yüzden çalışmada vektör tabanlı YİZ haritası üretilmesinde CBS-tabanlı bir yaklaşımın Adana kenti örneğinde gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda çalışmanın yöntemi 5 basamaktan oluşmaktadır. a) sınıflama kriterlerinin belirlenmesi, b) her bir sınıflama kriterinin Arc-GIS aracılığı ile haritalanması, c) YİZ haritasının oluşturulması için karar ağacının oluşturulması, d) karar ağacı doğrultusunda sınıflama kriterlerinin çakıştırılması, e) bulgular doğrultusunda önerilerin geliştirilmesi. YİZ sınıflarının vektör tabanlı sınıflanması, çözünürlükten

---

\* Sorumlu yazar (Corresponding author): Muge UNAL ÇİLEK, [unalm@cu.edu.tr](mailto:unalm@cu.edu.tr)

kaynaklı olabilecek sınıflama hatalarını en aza indirmiş ve yüksek doğruluğa sahip YİZ haritasının oluşturulmasını sağlamıştır. Çalışma sonucunda elde edilen YİZ haritasının kent iklimi ile ilgili çalışmalarda altlık olabilmesi ve karar vericilere yol gösterici olması beklenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Vektör-tabanlı, Yerel İklim Zonları, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Çok Kriterli Karar Analizleri (ÇKKA)

## 1. INTRODUCTION

Local Climate Zones (LCZ) define the region with similar surface-air temperature distributions at 100 m - 10000 m on the horizontal scale [1]. The main purpose of using this name is that the classes are local/regional in scale, regional in climatic terms. The land use/local climate classification system, defined as the LCZ, uses observational data to differentiate climate zones [2]. The definitions were determined in line with the characteristics of the areas that were similar in geometry and land cover under climatic conditions with calm and clear skies. To determine zones, there are 17 climate zones, divided into two groups as building types (LCZ 1-10) and land cover types (LCZ A-G), according to surface characteristics of urban and rural areas (Figure 1). The LCZ classification system is not designed to produce any maps but is intended to classify the areas of constant or mobile heat islands observed in urban or rural areas and to standardise landscape units [3]. However, mapping has been a good approach for visualising the LCZ classes in the urban and rural areas, as the main goal is to present landscape units.

There are three classification methods for mapping local climate zones according to data sources and analytical techniques. These are manual sampling, remote sensing and geographic information systems (GIS). A manual sample has not been widely applied in urban areas, as it is time-consuming and may lead to different results depending on the person making the classification [4,5]. Classification of satellite images in the creation of LCZ maps by remote sensing is based on object-based image analysis or supervised pixel-based classification techniques [6]. This method provides a fast and cost-effective LCZ classification based on free-access LANDSAT remote sensing images supported by NASA.

On the other hand, the GIS method analyses a more comprehensive data set than remote sensing and manual sampling methods. According to the data structure, there are two types of GIS methods: raster-based and vector-based. The raster method is a suitable method for classifying land surface features and performing spatial analysis. In addition, it has been successfully applied in many studies to produce urban climate maps, urban morphology maps and air circulation maps [7,8]. On the other hand, the vector method is advantageous in terms of defining the shapes of objects with their whole boundaries. In previous LCZ mapping studies, the vector method was generally used to obtain more detailed results [9,10].

In line with these determinations, it is aimed to implement the vector-based classification approach of local climate zones in the example of Adana city. It also aims to create a base map that can be used in urban heat island studies by making a detailed classification of Local Climate Zones. LCZ have common surface characteristics that vary from hundreds to thousands of meters depending on local surface conditions. In the high-density city of Adana, the surface conditions vary considerably in short distances due to the complex urban morphology. Therefore, this study has emerged to make a detailed and precise classification, the necessity of using the vector-based GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) method for LCZ maps.

## 2. MATERIAL AND METHOD

### 2.1. Study Area

The city of Adana is located in the south of Turkey, in the Eastern Mediterranean part of the Mediterranean Region (Çukurova Region). Adana,

the 6th most populated city in Turkey (37° 00' north latitude and 35° 19' east longitude), is the center of the Çukurova metropolitan area (Figure 1). The study area consists of the four

neighbourhoods with the urban settlement (Seyhan, Çukurova, Yüreğir, Sarıçam) which characterised by high development and settlements region in Adana City.






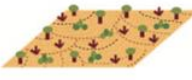






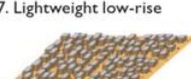




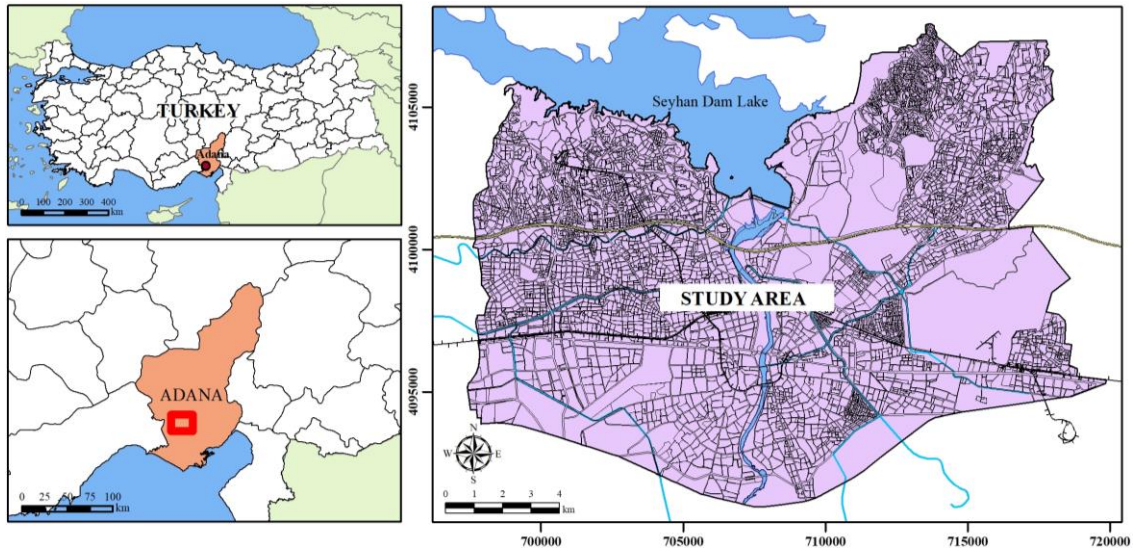
Built types	Definition	Land cover types	Definition
 <p>1. Compact high-rise</p>	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>A. Dense trees</p>	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>2. Compact mid-rise</p>	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>B. Scattered trees</p>	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>3. Compact low-rise</p>	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>C. Bush, scrub</p>	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
 <p>4. Open high-rise</p>	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>D. Low plants</p>	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
 <p>5. Open mid-rise</p>	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>E. Bare rock or paved</p>	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
 <p>6. Open low-rise</p>	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	 <p>F. Bare soil or sand</p>	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
 <p>7. Lightweight low-rise</p>	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	 <p>G. Water</p>	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
 <p>8. Large low-rise</p>	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	<b>VARIABLE LAND COVER PROPERTIES</b>	
 <p>9. Sparsely built</p>	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	Variable or ephemeral land cover properties that change significantly with synoptic weather patterns, agricultural practices, and/or seasonal cycles.	
 <p>10. Heavy industry</p>	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	<p>b. bare trees</p>	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
		<p>s. snow cover</p>	Snow cover > 10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		<p>d. dry ground</p>	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		<p>w. wet ground</p>	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Figure 1. The classification of Local Climate Zone [2]





**Figure 2.** Study area

The city is located in the Mediterranean climate zone with hot summers and mild winters; therefore, annual participation in outdoor activities is longer. The city has a warm and temperate climate, which can be named Csa according to the Köppen-Geiger climate classification.

The average amount of precipitation is 625 mm. Precipitation falls 51% in winter, 26% in spring, 18% in autumn, and 5% in summer. The coldest month is January at an average of 9 °C, and the warmest month is August at an average of 28 °C. The hottest annual period, that is, the period when the temperature does not fall below 21 °C, is quite long. Again in this period, the average daily relative humidity is above 65% [11].

The high agricultural potential of Adana City has led to the city's rapid development since the 1930s. City has been planned in the 1940s, but it resulted in the revision of the plans to meet the housing need of the increasing population [12]. Consequently, the city was formed as it is today. The Adana City developed around the city's historical core with high density and low rise building characteristics in the southern part of the study area. However, today, the city consists of

open high-rise buildings in the northern part of the study area.

## 2.2. Data

To determine LCZ classes of Adana City, data were obtained from different institutions and organisations. There are as follows:

- Adana City Environmental Plan (1:100.000),
- Adana Master Development Plan (1:25.000 and 1:50.000),
- Adana Implementation Development Plan (1:1.000)
- and Adana base map including urban development areas data.
- Moreover, aerial photographs, Urban Atlas data, and previous studies and reports are also supplementary materials.

The software used in the study are:

- GIS-based Arc-GIS software used for performing spatial analyses, including the classification of criteria and creating maps

**2.3. Method**

The method of the study consists of five stages;

- Determination of classification criteria,
- Mapping of classification criteria,
- Developing the decision tree to determine LCZ classes,
- Overlapping the classification criteria,
- Developing suggestions according to the findings

**a) Determination of classification criteria:** In the LCZ approach, which is dependent on the urban morphology, many criteria were used in the evaluation, but the main elements in the determination of LCZ classes were the characteristics of the settlement areas. These are building height (BH), aspect ratio (building height/street width- H/W), a pervious surface fraction (PSF), and impervious surface fraction (ISF). Each classification criteria has different threshold values (Table 1), which creates separate layers in determining LCZ classes.

**Table 1.** Values of geometric and surface cover properties of each LCZs type [2]

	Local Climate Zone (LCZ)	Sky view factor <sup>a</sup> (SVF)	Aspect ratio <sup>b</sup>	Building surface fraction <sup>c</sup> (BSF)	Impervious surface fraction <sup>d</sup> (ISF)	Pervious surface fraction <sup>e</sup> (PSF)	Height of roughness elements <sup>f</sup> (m)
<b>BUILT TYPES</b>	LCZ-1	0.2–0.4	> 2	40–60	40–60	< 10	> 25
	LCZ -2	0.3–0.6	0.75–2	40–70	30–50	< 20	10–25
	LCZ -3	0.2–0.6	0.75–1.5	40–70	20–50	< 30	3–10
	LCZ -4	0.5–0.7	0.75–1.25	20–40	30–40	30–40	>25
	LCZ -5	0.5–0.8	0.3–0.75	20–40	30–50	20–40	10–25
	LCZ -6	0.6–0.9	0.3–0.75	20–40	20–50	30–60	3–10
	LCZ -7	0.2–0.5	1–2	60–90	< 20	<30	2–4
	LCZ -8	>0.7	0.1–0.3	30–50	40–50	<20	3–10
	LCZ -9	> 0.8	0.1–0.25	10–20	< 20	60–80	3–10
	LCZ -10	0.6–0.9	0.2–0.5	20–30	20–40	40–50	5–15
<b>LAND COVER TYPES</b>	LCZ -A	<0.4	>1	<10	<10	>90	3–30
	LCZ -B	0.5–0.8	0.25–0.75	<10	<10	>90	3–15
	LCZ -C	0.7–0.9	0.25–1.0	<10	<10	>90	<2
	LCZ -D	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	<1
	LCZ -E	>0.9	<0.1	<10	>90	<10	<0.25
	LCZ -F	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	< 0.25
	LCZ -G	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	-
a Ratio of the amount of sky hemisphere visible from ground level to that of an unobstructed hemisphere							
b Mean height-to-width ratio of street canyons (LCZs 1–7), building spacing (LCZs 8–10), and tree spacing (LCZs A–G)							
c Ratio of building plan area to total plan area (%)							
d Ratio of impervious plan area (paved, rock) to total plan area (%)							
e Ratio of pervious plan area (bare soil, vegetation, water) to total plan area (%)							
f Geometric average of building heights (LCZs 1–10) and tree/plant heights (LCZs A–F) (m)							

**b) Mapping the classification criteria:** Mathematical formulas were used to create maps for each criterion in the GIS environment (Table 2). To determine the class differences within the layers in detail, the parcel boundaries in

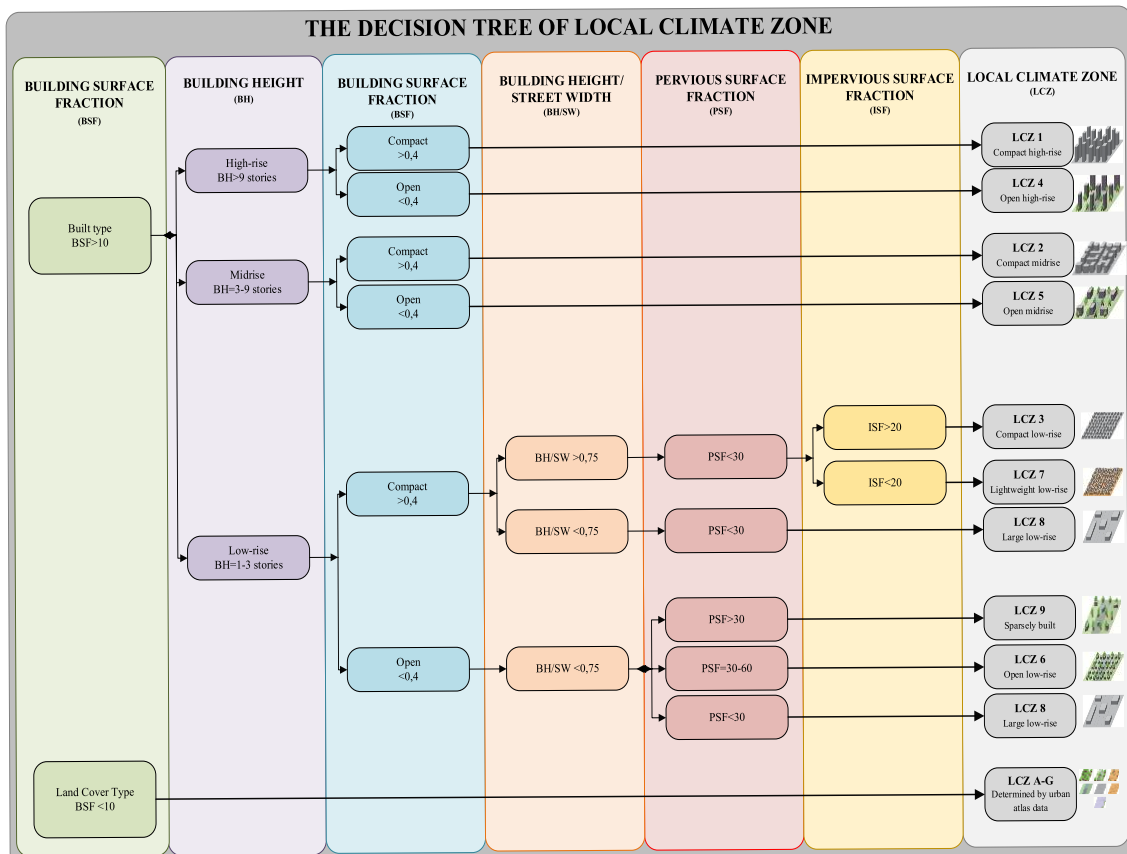
the study area were taken into account. Maps for each criterion were created by applying the determined formulas for each parcel in the GIS environment. Thus, more sensitive and accurate LCZ classifications were obtained.

**Table 2.** The definition of physical parameters and calculation methods used to classify local climate zones (LCZs) [12]

PHYSICAL PARAMETERS	DEFINITIONS	EQUATION
BH-Building height (m)	One of the main parameters used for LZY classification is the average building heights to determine high-rise, midrise, and low-rise LCZ classes [5]. Therefore the mean building height was found by multiplying the number of floors and the average floor height (3 m) and dividing it by the total number of buildings in a parcel.	$BH = \frac{\sum (Bf \times Bfh)}{n}$ <p>BH: Building height Bf: The number of stories Bfh: Story elevation (3m) n: The total number of building in a parcel</p>
BSF-Building surface fraction (%)	BSF is the fraction of land surface covered with buildings [5,13,14]. It is a crucial parameter employed to classify the built type (BSF > 0.10) and land cover type (BSF < 0.10) in addition to categorizing compact (BSF > 0.40) and open (0.10 < BSF < 0.40) LCZ classes in an urban area. It is calculated by the ratio of the total building footprint to the total parcel area, and the BSF of each polygon was calculated for each parcel.	$BSF = \frac{\sum_{i=1}^n Bfa}{Pa} \times 100$ <p>BSF: Building surface fraction Bfa: Building footprint area n: The total number of building in a parcel Pa: Total parcel area</p>
H/W-Aspect ratio	The aspect ratio is one of the most challenging calculated parameters because the building height and street width vary in the same street [5,15]. Therefore, the aspect ratio was calculated for each parcel. It is generally divided into two values: H/W < 0.75 and H/W > 0.75. The mean aspect ratio was found using the mean building height divided by the mean street width. The total street width computed the average street width around the parcel divided by the edge number of parcels.	$H/W = \frac{BH}{SW}$ <p>H: Height W: Width BH: Building height SG: Street width</p>
PSF-Pervious surface fraction (%)	Waterbody and vegetated areas, which mitigates the urban heat island effect by evaporation, described as a pervious surface in a metropolitan area. The pervious surface fraction (PSF) is an important parameter used to define LCZ classes at a local scale. PSF is the percentage of pervious surfaces in a parcel area for this study. The percentage of water bodies was determined using the planning data, while remote sensing data decided the presence of vegetation cover. To determine PSF, the Landsat data of the study area were used to derive a Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) image calculated by the following equation.	$PSF = \frac{\sum_{i=1}^n PSA_i}{Pa} \times 100$ <p>PSF: Pervious surface fraction PSA: The area of pervious surface Pa: Total parcel area</p>
ISF-Impervious surface fraction (%)	$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red}$ <p>According to the publication of NASA, NDVI values were assumed to be vegetation &gt; 0.2, water= 0.0, and 0 &lt; impervious surface &lt; 0.2 [5,13,16,17]. Therefore, the raster-based NDVI map was developed to identify PSF and was converted into a vector-based plan. Therefore, PSF was determined for each parcel in the study area.</p>	$ISF = (1 - (BSF + PSF)) \times 100$ <p>ISF: Impervious surface fraction PSF: Pervious surface fraction BSF: Building surface fraction</p>
Land use map	To classify the land use types of LCZ, the characteristic of land use and land cover types for each parcel and polygons were identified.	

**c) Developing a decision tree:** In the study, a decision tree was developed by considering the threshold values determined for each criterion by [2]. Although different values were determined for each class, some classes have similar values in terms of some properties. To decide the suitable LCZ classes, the differences of other characteristics take into account. Firstly, the building types and land cover types were distinguished by considering the BSF. Areas with a building surface fraction value greater than 10% represented building areas, while areas less than 10% represented land cover types. This distinction constitutes the basic distinction of building types and land cover types before the detailed classification of LCZ classes. The threshold values were decisive in determining building types (LCZ 1-10); on the other hand, urban atlas data was used to classify the land cover classes (LCZ A-G).

Secondly, building types were distinguished according to building height by considering the number of stories. Building heights are defined as “high-rise” over 9 stories, “mid-rise” 3-9 stories, and “low-rise” buildings lower than 3 stories. Thirdly, the density of building were determined with BSF. Areas with more than 40% structure within an area are defined as “compact”, while areas below 40% are defined as “open”. According to the second and third steps of a decision tree, compact high-rise LCZ 1, compact midrise LCZ 2, open high-rise LCZ 4, and open midrise LCZ 5 were determined. However, building height and BSF are not sufficient to determine other LCZ classes with low-rise buildings. Therefore, these LCZ classes were determined, taking into consideration of other characteristics differences. On the other hand, Urban Atlas data were used in the classification of land cover types.



**Figure 3.** The decision tree of LCZ mapped in the GIS environment [12]

**d) Overlapping of layers:** LCZ classes were obtained by overlapping the classification criteria through Arc-GIS in line with the first three steps of the methodology.

### **3. RESULTS**

To classify LCZ, firstly, the analysis was performed for each building parcel in Adana City. GIS-based vector method was preferred for easy, precise, detailed, and comprehensive analysis of LCZ classes. Secondly, the values and calculations. Secondly, the values and formulas determined in the method of the study were taken into account for the LCZ classifications. The building height, aspect ratio, building surface fraction, impermeable surface ratio, permeable surface ratio, existing vegetation, and land cover characteristics were defined for each building parcel and maps were produced for each classification criteria (Figure 4). Figure 4 shows the following issue:

- **Building height (BH):** Areas without buildings, such as roads, airports, agricultural areas, green spaces etc., have a total percentage of 37.2% in the study area. Low rise buildings (1-3-storey), which form the predominant building type of the city, have a large proportion with 49.7% of the study area. High-rise buildings (>9-storey) constitute 8.3% of the north of the study area. Mid-rise facilities (3-9-storey) located in the city center and the city's western parts include only 4.3% of the area.
- **Building surface fraction (BSF):** BSF, firstly, was used to distinguish the building types and land cover types of LCZ in the study area. Secondly, it was used to determine building density divided into two groups, including compact and open. Figure 4 shows that building density in the city center (10.0%) is generally compact, while the other building areas constitute 36.8% of the study area.
- **Aspect ratio (H/W):** BSF, aspect ratio and BH affect the LCZ classification because of caused different aspect ratios. Since there may be different building heights on the same street, each building parcel needs to be separately calculated. In building types of LCZ, as the canyon effect increases in the higher aspect ratio, the canyon effect decreases in the lower aspect ratio. Therefore, the canyon effects are high in the high-rise building parcels in the northern part of the study area. While the canyon effect is decreased in low-rise building parcels. The dominant aspect ratios in the other parts of the study area are 0.30-0.50 and 0.50-0.75, with a total of 36.2%.
- **ISF and PSF:** Although permeable and impermeable surface fractions are similar to each other in terms of classification values, these values are not shown in contrast areas. The permeable surface fraction (PSF) is determined by the percentage of permeable surfaces (bare soil, vegetation, etc.) in the total size of the building parcel. While the impervious surface fraction (GSF) is determined by the percentage of impervious surfaces (asphalt, stone, concrete) except building surface area in the total building parcel area. The study is covered by building area have a total percentage of 62.8%. Areas without buildings such as roads, airports, agricultural areas, green spaces etc., have a total percentage of 37.2% in the study area. However, all of these areas have not high permeable surface fractions. Agricultural areas have generally located the surrounding urban settlements. As you move away from the city center, the pervious surface fraction ratio increases. In buildings area, green spaces generally have higher pervious surface areas. On the other hand, the compact building area, which is located in the southern part of the study area, has a higher impervious surface fraction.



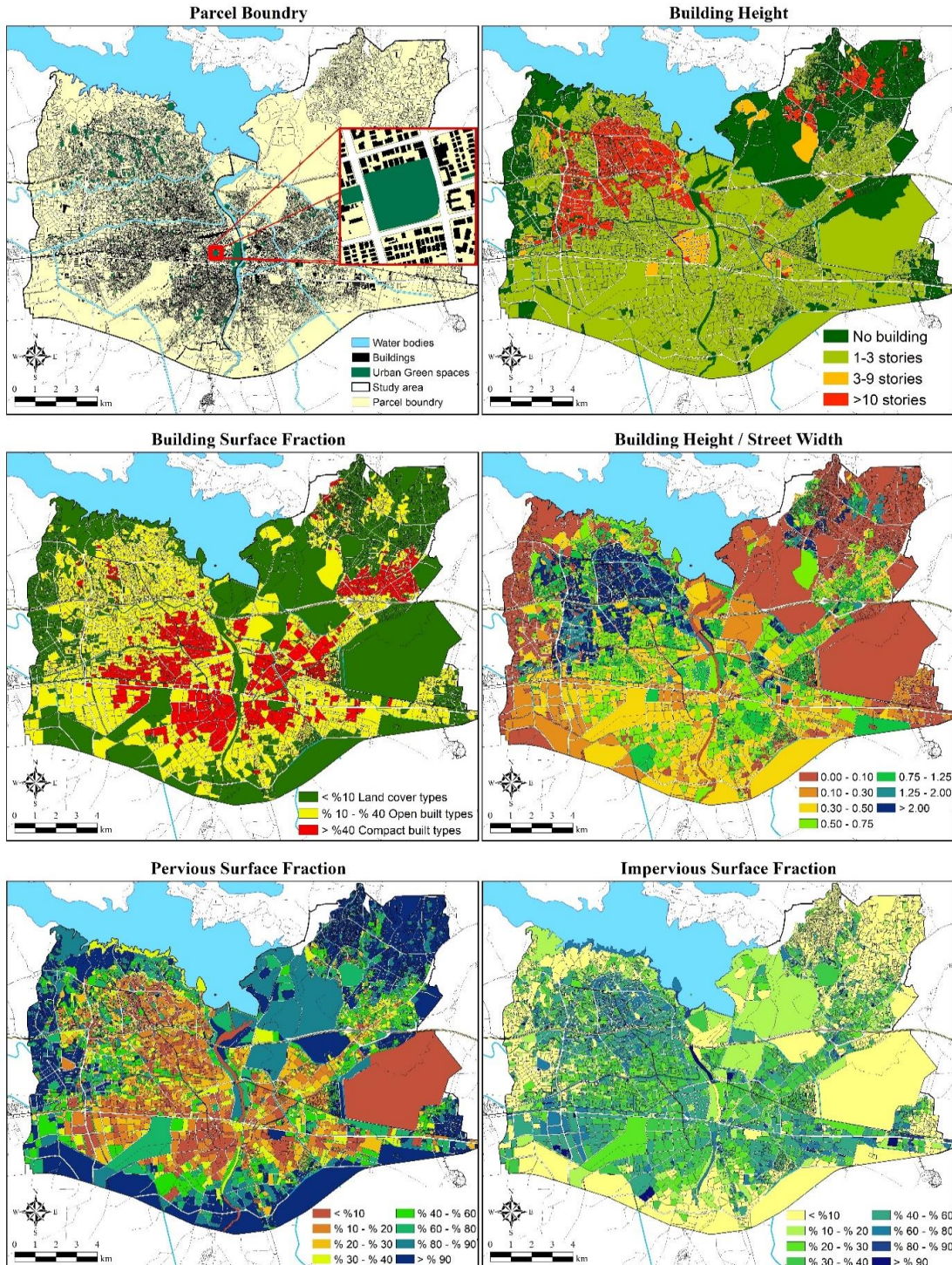


Figure 4. GIS-based map for LCZ indicators [12]



As a result of overlaying the classification criteria maps in the direction of the decision tree, the LCZ map of Adana City was obtained (Figure 5). The distribution of each LCZ class in the study area is given in Table 3. While 46.8% of the study area is composed of LCZ 1-10 building types, 53.2% is LCZ A-G, which are land cover types. Although all LCZ classes (except LCZ F) exist in the study area, some classes are dominant. The city center, where low-rise buildings are located, is generally defined as LCZ 3 due to its compact building pattern.

From the city center to the south, the building pattern changes as the open low-rise LCZ 6 class. In the north-northwest parts of the city, where open high-rise buildings are located, the LCZ 4 class is dominant. In the areas between LCZ 4 and the Seyhan Dam Lake, the areas with natural vegetation are LCZ C. LCZ A, where areas with dense vegetation are generally located around the lake and river. In the northwestern part of the city, it is defined as LCZ D, as there are usually agricultural areas.

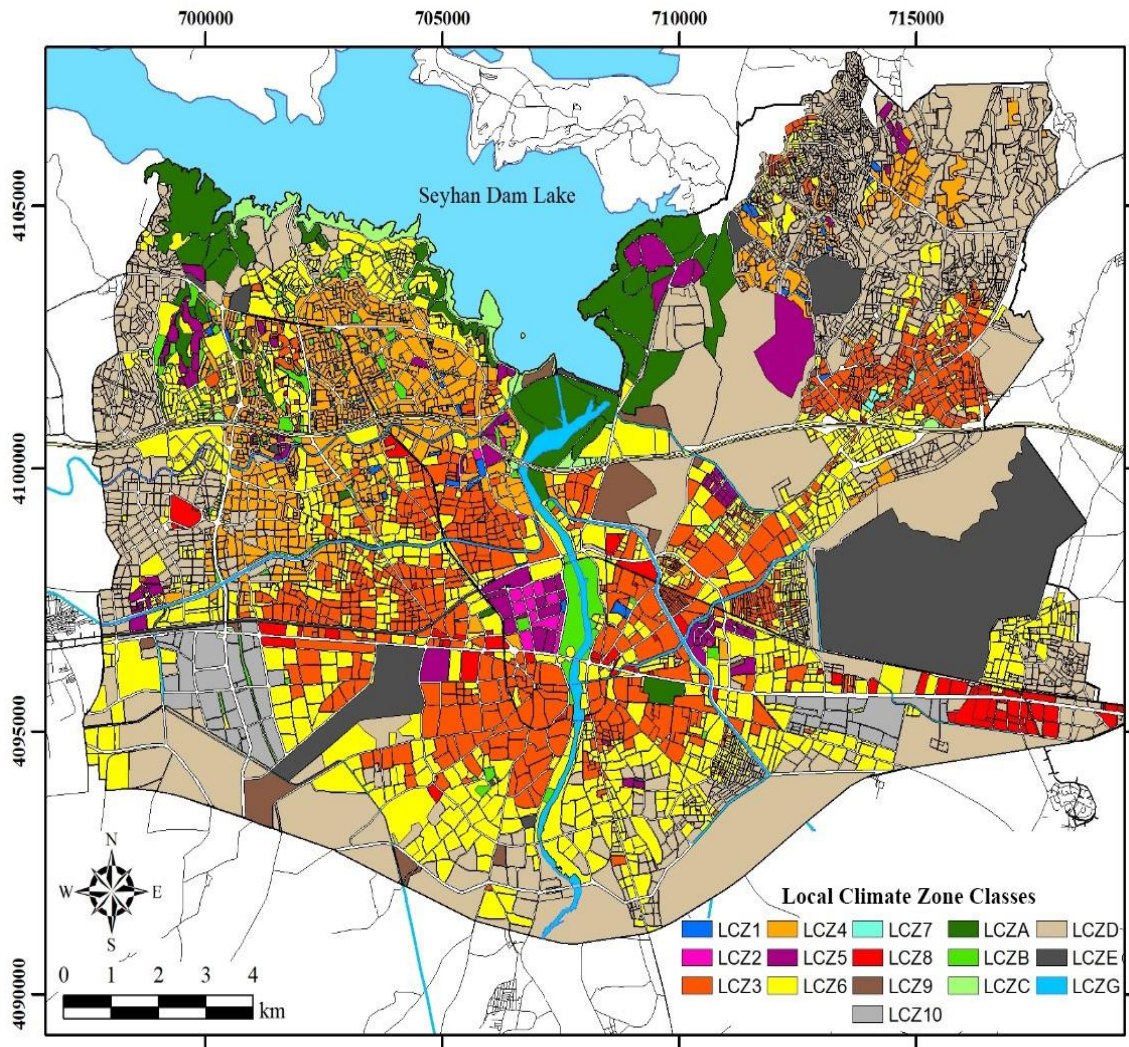


Figure 5. Adana city local climate zone map



**Table 1.** The distribution of Local Climate Zone classes

BUILDING TYPES			LAND COVER TYPES		
LCZ Classes	Area Size (Ha)	Percentage (%)	LCZ Classes	Area Size (Ha)	Percentage (%)
1	59,72	0,2	A	2.051,36	7,0
2	69,16	0,2	B	684,51	2,3
3	2.654,29	9,1	C	185,08	0,6
4	2.261,40	7,8	D	8.372,45	28,7
5	1.298,61	4,5	E	4.025,70	13,8
6	5.686,18	19,5	F	-	-
7	15,36	0,1	G	214,18	0,7
8	358,92	1,2			
9	655,50	2,2			
10	584,58	2,0			
			<b>Study area</b>	<b>29.176,06</b>	<b>100</b>

#### 4. CONCLUSION

Local Climate Zone studies are widely used in urban heat island studies because they classify according to the surface properties of cities. LCZ, based on urban morphology, many studies have used a raster-based method that depends on remote sensing data and requires supervised classification and verification [13,19–21]. However, in this study, GIS-based analyses were performed to perform vector-based classification. The advantages of vector-based LCZ classification can be listed as follows:

- While raster-based methods require local knowledge, the vector-based method is advantageous in analysing and overlapping LCZ criteria in the GIS environment.
- While there are manual correction possibilities for classes that may be faulty in vector-based analysis, it is challenging to correct faulty classes in raster-based analysis.
- Raster-based analyses have course resolution, resulting in data loss and inclusion of different classes of LCZ classes. On the other hand, since the numerical data of the city are used with coordinates in vector-based analyses, the errors that may arise from the resolution are minimised.

Because of these advantages, vector-based analyses can be preferred for more precise urban

heat island studies or change analysis evaluations. In addition, a large dataset and base data will be obtained that can be a base map for urban climate studies and guide decision-makers.

#### 5. REFERENCES

1. Stewart, I., Oke, T., 2009. Classifying Urban Climate Field Sites by “Local Climate Zones”: the Case of Nagano, Japan. In: The Seventh International Conference on Urban Climate. The Seventh International Conference on Urban Climate, 29 June-3 July 2009, Yokohama, Japan, 1–5.
2. Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879–1900.
3. Kántor, N., Unger, J., 2011. The Most Problematic Variable in the Course of Human-biometeorological Comfort Assessment-The Mean Radiant Temperature. Central European Journal of Geosciences, 3(1), 90-100.
4. Chen, Y., Zheng, B., Hu, Y., 2020. Mapping Local Climate Zones Using ArcGIS-Based Method and Exploring Land Surface Temperature Characteristics in Chenzhou, China. Sustainability, 12(7), 2974.
5. Zheng, Y., Ren, C., Xu, Y., Wang, R., Ho, J., Lau, K., Ng, E., 2018. GIS-based Mapping of Local Climate Zone in the High-density City of Hong Kong. Urban Climate, 24, 419–448.

6. Bechtel, B., Daneke, C., 2012. Classification of Local Climate Zones Based on Multiple Earth Observation Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4): 1191-1202.
7. Ng, E., Yuan, C., Chen, L., Ren, C., Fung, J.C.H., 2011. Improving the Wind Environment in High-density Cities by Understanding Urban Morphology and Surface Roughness: A Study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 101(1), 59–74.
8. Ren, C., Lau, K.L., Yiu, K.P., Ng, E., 2013. The Application of Urban Climatic Mapping to the Urban Planning of High-density Cities: The Case of Kaohsiung, Taiwan. *Cities*, 31, 1–16.
9. Perera, N., 2015. Climate-sensitive Urban Public Space: a Sustainable Approach to Urban Heat Island Mitigation in Colombo, Sri Lanka. University of Moratuwa, Department of Architecture, PhD Thesis, Sri Lanka, 273.
10. Gál, T., Bechtel, B., Unger, J., 2015. Comparison of Two Different Local Climate Zone Mapping Methods. *ICUC9-9<sup>th</sup> International Conference on Urban Climates*, Toulouse, France (20-24 July).
11. TSMS, 2019. Turkish State Meteorological Service [online]. Available from: <https://mgm.gov.tr/eng/forecast-cities.aspx>.
12. Unal Cilek, M., Cilek, A., 2021. Analyses of Land Surface Temperature (LST) Variability Among Local Climate Zones (LCZs) Comparing Landsat-8 and ENVI-met Model Data. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102877.
13. Estacio, I., Babaan, J., Pecson, N.J., Blanco, A.C., Escoto, J.E., Alcantara, C.K., 2019. GIS-based Mapping of Local Climate Zones Using Fuzzy Logic and Cellular Automata. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives*, 42 (4/W19), 199–206.
14. Zhou, X., Okaze, T., Ren, C., Cai, M., Ishida, Y., Watanabe, H., Mochida, A., 2020. Evaluation of Urban Heat Islands Using Local Climate Zones and the Influence of Sea-land Breeze. *Sustainable Cities and Society*, 55 (April 2019), 102060.
15. Ng, E., Cheng, V., 2012. Urban Human Thermal Comfort in Hot and Humid Hong Kong. *Energy and Buildings*, 55, 51–65.
16. Bartesaghi Koc, C., Osmond, P., Peters, A., Irger, M., 2018. Understanding Land Surface Temperature Differences of Local Climate Zones Based on Airborne Remote Sensing Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(8), 2724–2730.
17. Quan, J.L., 2019. Enhanced Geographic Information System-based Mapping of Local Climate Zones in Beijing, China. *Science China Technological Sciences*, 62(12), 2243–2260.
18. Stewart, I.D., 2013. Local Climates of the City. *Architectural Design*, 83(4), 100–105.
19. Gholami, R., Beck, C., 2019. Towards the Determination of Driving Factors of Varying LST-LCZ Relationships: A Case Study Over 25 Cities. *Geographica Pannonica*, 23(4), 289–307.
20. Bande, L., Manandhar, P., Marpu, P., Battah, M., Al, 2020. Local Climate Zones Definition in Relation to ENVI-met in the City of Dubai, UAE. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 829(1), 012013.
21. Ochola, E.M., Fakharizadehshirazi, E., Adimo, A.O., Mukundi, J.B., Wesonga, J.M., Sodoudi, S., 2020. Inter-local Climate Zone Differentiation of Land Surface Temperatures for Management of Urban Heat in Nairobi City, Kenya. *Urban Climate*, 31 (November), 100540.

## Effect of Various Matrix Materials on Mechanical Properties of Basalt/Jute/Glass Fiber Reinforced Hybrid Composites

Berkay KARAÇOR\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-5208-366X  
Mustafa ÖZCANLI<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-6088-2912

<sup>1</sup>Cukurova University, Faculty of Engineering, Department of Automotive Engineering, Adana

Geliş tarihi: 09.07.2021 Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: KARAÇOR, B., ÖZCANLI, M., (2021). Effect of Various Matrix Materials on Mechanical Properties of Basalt/Jute/Glass Fiber Reinforced Hybrid Composites. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 941-954.

### Abstract

In this research, the effect of different matrix materials (epoxy and vinylester) on the mechanical properties of Basalt, Jute, and Glass fiber-based hybrid composites were analyzed mechanically and morphologically. The mechanical test results were achieved by the Tensile test and Vickers hardness test, while morphologic images were obtained by Scanning Electron Microscopy. Basalt fiber fabric, Jute fiber fabric, and Glass fiber fabrics of 86 gr/m<sup>2</sup> and 100 gr/m<sup>2</sup> were used as reinforcement elements, while epoxy and vinylester were utilized as matrix materials. A vacuum assisted resin transfer molding method was used as the production technique. In the results, it is given how the use of different reinforcement element types and different matrix materials affects the mechanical properties of the produced composite samples. Results show that the tensile strength of basalt fiber/glass fiber (100 gr/m<sup>2</sup>) reinforced with epoxy is the highest in all of the produced composites. In terms of microhardness, the hardness value of basalt fiber/glass fiber (100 gr/m<sup>2</sup>) reinforced epoxy composites have 1.39 times higher than basalt/glass fiber (100 gr/m<sup>2</sup>) reinforced vinylester composites. Scanning electron microscopy (SEM) analysis was utilized to examine the fiber rupture and fracture mode in hybrid composites. As a result of the analysis, also it was observed SEM results support the mechanical test results.

**Key Words:** Matrix material, Glass fiber, Basalt fiber, Jute fiber, Mechanical properties

### Çeşitli Matris Malzemelerinin Bazalt/Jüt/Cam Elyaf Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisi

#### Öz

Bu araştırmada, farklı matris malzemelerinin (epoksi ve vinilester) Bazalt, Jüt ve Cam elyaf esaslı hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi mekanik ve morfolojik olarak analiz edilmiştir. Çekme testi ve Vickers sertlik testi ile mekanik test sonuçları elde edilirken, Taramalı Elektron Mikroskobu ile morfolojik görüntüler elde edildi. Takviye elemanı olarak bazalt elyaf kumaş, Jüt elyaf kumaş ve 86 gr/m<sup>2</sup> ve 100 gr/m<sup>2</sup> cam elyaf kumaşlar, matris malzemesi olarak epoksi ve vinilester kullanılmıştır. Üretim tekniği olarak vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi kullanılmıştır.

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Berkay KARAÇOR, bkaracor@cu.edu.tr

Sonuçlarda, farklı takviye elemanı tipleri ve farklı matris malzemelerinin kullanılmasının üretilen kompozit numunelerin mekanik özelliklerini nasıl etkilediği verilmiştir. Sonuçlar, epoksi ile güçlendirilmiş bazalt elyaf/cam elyafın (100 gr/m<sup>2</sup>) çekme mukavemetinin üretilen tüm kompozitler içinde en yüksek olduğunu göstermektedir. Mikrosertlik açısından bazalt elyaf/cam elyaf (100 gr/m<sup>2</sup>) takviyeli epoksi kompozitlerin sertlik değeri, bazalt/cam elyaf (100 gr/m<sup>2</sup>) takviyeli vinylester kompozitlere göre 1,39 kat daha yüksektir. Hibrit kompozitlerde fiber kopma ve kırılma modunu incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi kullanılmıştır. Analiz sonucunda SEM sonuçlarının da mekanik test sonuçlarını desteklediği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Matriks malzeme, Cam fiber, Bazalt fiber, Jüt fiber, Mekanik özellikler

## 1. INTRODUCTION

Composite materials, with their different mechanical, physical, and chemical properties, are among the materials whose use has recently increased in advanced technology applications in the fields of automotive, aerospace, construction, medicine, and in many engineering fields [1]. In modern advanced composite materials, with the effect of the plastic age, fiber-reinforced varieties have become one of the most important types in terms of structure [1]. Natural fibers are examined in three categories, depending on the source, as animal, plant and mineral-based fibers. Examples of common plant fibers encompass jute fibers, flax fibers, banana fibers, bamboo fibers, sisal fibers, kenaf fibers and coconut fibers, while animal-based fibers contain wool from alpaca and chicken feathers and silk from butterfly larvae and spiders. Basalt fiber, which has lately achieved favor as composite reinforcement, is one of the best-known mineral fibers [2]. This mineral type fiber is extruded from molten basalt rock, usually in diameters between 13 µm and 20 µm. It is known to be a versatile material and to operate in temperature ranges from -200 °C to +600 °C [3-6]. The importance of basalt fibers is increasing gradually as an alternative to glass fibers in reinforcement elements in composite materials in terms of ecological reliability, natural longevity, and non-flammability. Besides, basalt fiber composites are preferred over glass fibers in the automotive industry where acids are used extensively, as they are superior to the acid, alkali, and vapor resistance properties of glass fibers with their high chemical stability [3-6]. They are also ideal materials for thermal and sound insulation of

automobile interior and engine parts. Owing to its superior combination of wear and heat resistance in brake systems in vehicles, it has also replaced asbestos [3-6]. Basalt fibers are materials that have been used extensively in military applications since their discovery and have the potential to combine with other fibers for lightweight structures with affordable cost and good mechanical properties. Basalt fiber is referred to as lower priced and more environmentally friendly compared to carbon fibers, with both the absence of resource problems and the originality of the production process, as it is obtained from basaltic volcanic rocks. While basalt fiber is used to reinforce thermoset polymers such as epoxy and polyester, it shows good adherence with various polymer matrices [7-8]. With its various properties, basalt fibers are used in many areas as friction and wear materials in automobiles, corrosion resistance material in the chemical industry, and reinforcement material in the construction sector. It is widely used in automotive, especially in the production of car headliners and high temperature insulation of automobile catalysts [9]. Jute, linen, wood, cotton, bamboo, sisal and hemp from natural fibers are used as reinforcements in polymeric matrices. When all naturally obtained reinforcement materials are examined, the availability of jute fabrics in desired shapes and being cost effective compared to others is an important potential for future studies. Jute is made of vegetable fibers and consists of cellulose units; its fibers are biodegradable and recyclable. Among the natural vegetable fibers, jute has relatively high tensile strength and high production volume as well as being an environmentally friendly material, showing good thermal and acoustic insulation

properties. However, the cellulose structure of jute fibers is rich in hydroxyl groups and its compatibility with polymeric matrices is not strong. This disadvantageous situation is eliminated by applying chemical or physical modifications to the fiber surfaces, thereby improving the interfacial bond of jute fibers with polymeric materials [10-12]. Glass fibers are one of the materials that have many applications in various industrial sectors such as thermal and electrical insulation, various sports equipment, household goods. The properties of glass fiber reinforced products such as the expected strength in structural applications in automobiles and at the regard of well interfacial matrix-fiber bond and improved production methods have proven the use of glass fibers in automotive structural parts. In terms of production costs, the cost of glass fibers is lower than carbon fibers. Moreover, the fact that glass fiber is a strong and hard material would provide a significant benefit in the cost and strength of hybrid materials in hybridization processes. It has been observed that hybrid laminates made with glass/plant fiber are at the forefront of features such as producing sustainable materials, causing the least damage to the environment during production and at the end of their service life, having sufficient mechanical resistance and an acceptable impact performance [13-15]. In the literature, there are some studies on the effect of different glass fibers on the mechanical properties of hybrid composite samples created with jute and basalt. There are only a few studies in the literature that have worked on hybrid composites made using glass fibers of different weights per square meter, and basalt, jute, and glass fiber reinforced composites created using epoxy and vinylester resin. Sarasini et al. [16] studied the effect of stacking sequence on low-speed impact, bending, and acoustic properties of epoxy composites hybridized using basalt fibers and glass fibers. They utilized two different stacking orders, intercalated and sandwich-like. Flexural test results show that glass fiber hybrid laminates have the highest flexural strength, whereas basalt fiber laminates have the lowest. Because of the stacking order, it has emerged that the samples which were hybridized with basalt and glass fiber intercalated hybrid

laminates provide higher strength in comparison to sandwich configuration. Gangappa and Kulkarni [17] hybridized with polyester resin using basalt and jute as reinforcement material. They examined the effect of warp and weft direction and material thickness on tensile and compressive strength. It was understood that warp weaves valued both tensile and compression strength higher than weft weaves. It has been observed that the increase in material thickness has a decreasing effect on tensile strength and an increase in compression strength values. Jusoh et al. [18] investigated how the hybridization process and the pattern of these fibers in composites formed with glass fiber, basalt, jute, and flax fibers affect the bending strength. In terms of hybridization, it was understood that the glass/jute sandwich-like structure showed optimum integration with E-glass against other fibers produced in the research, and the delamination mechanism did not occur due to the presence of the glass layer in the fracture analysis. Dhiman and Sharma [19] manufactured jute and walnut shell filled jute/basalt hybrid composites in different proportions and examined their mechanical performance. The results show that the addition of walnut shell filler (between 0% and 15%) increases the tensile strength of basalt/jute fiber composites by about 60%. Kishore et al. [20] analyzed tribological properties in samples made with basalt, jute, and jute/basalt hybrid composite materials using graphene as filling material. The specific wear rate and friction coefficient were discovered to be the lowest with the hybrid composite including 0.4% graphene by weight. It was stated that the basalt fiber on the contact surface provided a 53% improvement in the friction coefficient and specific wear rate. In another study using jute/basalt reinforced hybrid composites, Kishore et al. [21] used graphene in three different amounts (0.2%, 0.4% and 0.6%) as a filler. It was observed that hybrid composites with graphene-doped composites showed fewer roughness values than composite without graphene added. Fiore et al. [22] studied the effect of aging on mechanical properties by producing jute and jute/basalt hybrid composites with vacuum infusion technique. The results of quasi static bending tests and low velocity impact tests showed that basalt fibers increased the durability of natural

fiber composites and jute/basalt hybrid laminates gave the best mechanical results. Surface treatment applications are applied to increase the durability effect of the fibers in composites made with natural fibers and to exhibit a better interface bond with the matrix [23]. Raajeskrishna et al. [24] studied the strength of tensile and stiffness of hybrid composites with and without surface treatment, reinforced with glass fiber fabric and basalt fabric with sandwich stacking sequence configuration. They also confirmed their experimental results with finite element analysis. The fibers of the basalt fabric in the inner structure and the glass fabric as the outer surface, treated with HCl (hydrochloric acid), have the highest tensile strength with 356.39 MPa, shows the positive effect of the hybridization process and surface treatment on the tensile strength. Fiore et al. [25] surveyed the mechanical properties, morphological properties and aging resistance of jute and basalt reinforced bio-based epoxy composites. They used jute and basalt fibers in three different stacking sequences, and in the analysis, interply hybrid composites reached better values compared to jute lamina fiber composites and turned out to be an important alternative for outdoor applications. Sanchez-Galvez et al. [26] studied the effect of different environmental conditions on the high-speed impact performance of basalt, glass/basalt, and carbon/basalt hybrid composites. While the best performance was observed for glass/basalt hybrid reinforcement with a ballistic limit of 480 m/s, experimental results were also confirmed by analytical results. Jusoh et al. [27] analyzed the impact of shifting the piling order of fabric layers on the low-speed impact behavior of hybrid composites containing glass woven fabric, basalt fabric, jute fabric, and linen woven fabric in varying sequences within the epoxy matrix. When the hybrid composite values are examined, the results of the specific energy absorption and indentation energy analysis are mainly dependent on the high modulus and strength value of the glass fiber rather than the low features of the natural fibers. Esnaola [28] studied the energy absorption ability of products created by hybridizing glass fiber and basalt fiber with polyester. The results obtained showed that among the six different configurations and fiber strands

used, the hybrid configuration where polyester was used with E-glass and basalt fibers avoided unstable collapse problems compared to basalt/polyester hybrids. The object of this search is to examine the main effects of using different matrixes on the mechanical properties of hybrid composites made of glass fiber fabric and jute fabric with basalt fiber from mineral fibers and to make the morphological analysis of the products obtained.

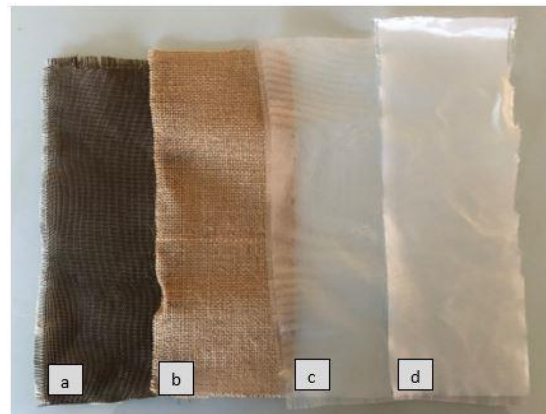
## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Material

Basalt, E-glass and Jute plain weave fabrics were used as reinforcement materials. All reinforcement materials were supplied by Kompozitshop, Turkey. Table 1 gives the fabric parameters of this study. The fabric samples are indicated in Figure 1.

**Table 1.** Properties of fabrics

Fabric	Weight (gr/m <sup>2</sup> )	Thickness of fabric (mm)	Warp (tex)	Weft (tex)
Basalt	280	0.2	–	–
Jute	265	0.7	312.5	312.5
Glass Fiber	86	0.06	34x1	12x12.5
Glass Fiber	100	0.08	22x1	24x2.8



**Figure 1.** Fabric samples a) Basalt fiber fabric b) Jute fiber fabric c) Glass fiber fabric (86 gr/m<sup>2</sup>) d) Glass fiber fabric (100 gr/m<sup>2</sup>)

Epoxy resin (L160) with its related hardener (LH160) and vinyl ester with its additives was used as a matrix material. Table 2 and Table 3 indicates the technical properties of the resin systems. While the mixing ratio of epoxy resin and hardener is 100:25±2 by weight as specified by the manufacturer, the mixing ratio for vinyl ester resin is Vinyl ester: cobalt: perox ratio of 1: 0.0004: 0.02 weight.

**Table 2.** Epoxy and hardener properties

	<b>L160 Infusion epoxy</b>	<b>LH160 Hardener</b>
Operating temperature (° C)	-60/+50 without heat treatment -60/+80 by applying heat treatment	-
Process temperature (° C)	+10/+50	-
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.13-1.17	0.96-1.0
Viscosity (mPas)	700-900	10-50
Refractor index	1.5480-1.5530	1.5200-1.5210
Amine value (mgr KOH/gr)	-	550-650
Measurement Conditions	25°C	25°C

**Table 3.** Vinylester properties

	<b>Molding</b>	<b>Laminate</b>
Heat distortion temperature (°C)	137	-
Flexural strength (MPa)	130-140	132
Bending coefficient (MPa)	3400-4000	7400
Viscosity (mPas)	180-220	
Tensile strength (MPa)	69-79	93
Barcol Hardness	42	50

In this study, twelve composite samples using a different matrix and having various fabric stacking sequences were produced. Reference codes for fabric layers in composite samples are given in Table 4.

**Table 4.** Codes of produced samples

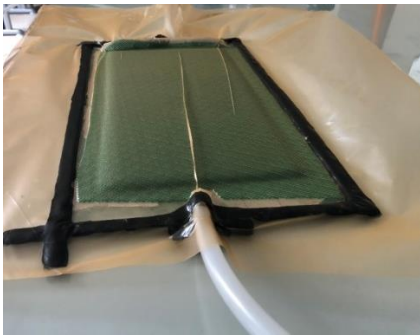
<b>Composite codes</b>	<b>Fabric types</b>
B	Basalt fabric
J	Jute fabric
G86	Glass Fiber fabric (86 gr/m <sup>2</sup> )
G100	Glass Fiber fabric (100 gr/m <sup>2</sup> )
JB	Jute/Basalt Fiber hybrid composite
BG86	Basalt/Glass Fiber (86 gr/m <sup>2</sup> ) hybrid composite
BG100	Basalt/Glass Fiber (100 gr/m <sup>2</sup> ) hybrid composite



After 60 °C curings at 1 hour, the composite specimens were cut by the water jet machine to the test dimensions specified in the standards.

## **2.2. Method**

In order to produce jute, basalt, and glass fiber fabric reinforced composite laminates, vacuum assisted resin transfer molding was used. In this method, a vacuum force is used to remove air from the reinforcement material and allow the resin to enter the preform. After making provision the designated area by applying a release agent, the fabrics were laid on the table and the layered fabric was covered with peel ply, an infusion mesh, and a vacuum bag. Sealing in the system was ensured by sticking the vacuum sealing band around the fabrics. A small hollow was also made in the vacuum bag to allow the inlet and outlet pipes to cross through. Then, in order to the suck the resin, vacuum pump was turned on. The vacuum pump was operated for about 2 hours (about 1 bar) and was turned off when the excess resin flow stops. The whole process was carried out at room temperature (20 °C ±2 °C) under 1 bar pressure and the sample formed was left to cure for 24 hours.



**Figure 2.** Vacuum assisted resin transfer molding process

### **2.2.1. Testing**

#### **2.2.1.1. Mechanical Testing**

In this research, the mechanical properties were interpreted in terms of the tensile strength of the

produced composite samples. The tensile test was done with reference to the ASTM D 3039 standard using ALSA Hydraulic Test Machine (KOLUMAN Automotive Industry Laboratory) and 2 mm/min is set as the cross-head speed on the device with a 98000 kN load cell [29]. Beforehand the test, the width and depth of the consecutive test samples were measured and the values were processed into the machine. Figure 3 indicates the universal tensile testing machine. By the tensile test; Tensile Strength, Elastic Modulus, Stress-Strain diagram, and Elongation rate of hybrid composites were calculated. After the five samples were cut in the water jet in each configuration created, the tests were performed and the arithmetic averages of these 5 sample values were taken and indicated in the results.



**Figure 3.** Tensile testing machine

#### **2.2.1.2. Hardness Test**

Vickers hardness test, also called the 136-degree diamond pyramid hardness test, is a micro indentation test method used for materials. The Vickers hardness number of the material is determined by creating a square indentation, the diagonals of which are measured, in the indentation on the material. This value is obtained directly from the Vickers hardness testing machine [30]. Vickers hardness value was found by taking an average of fifteen readings in different places in each sample. AOB Lab product machine was used to analyze the hardness test of samples according to the ASTM E92-17 standard [31]. The Vickers hardness test machine is shown in Figure 7.



Figure 4. Hardness test machine

### 2.2.1.3. Morphological Analysis

Scanning electron microscopy (SEM) method is used to analyze the fiber morphology of the materials and in this way, the fracture surface and fiber-matrix interactions of the composites are examined. The samples produced were observed using the Scanning Electron Microscope (SEM) FEI Quanta 650 Field Emission device at 100V-30kV acceleration voltage. The magnification capacity of the device is in the range of 6-1.000.000 x times (Figure 5). The non-conductive surfaces in the composites were overlaid with gold with the help of the Q150R ES spray coating device before being subjected to SEM. Generally, a conductive gold layer was fixed to the metal sample holder by surface evaporation by means of an electrically conductive adhesive to prevent electrostatic charging in the samples. Figure 6 shows the device used for the gold plating process.



Figure 5. SEM Analysis machine



Figure 6. Gold plating process machine

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

#### 3.1. Mechanical Testing Analysis Results

Tensile test results are indicated in Figure 7, Figure 8, and Figure 9. As shown in Figure 7, the tensile strength value of JB with epoxy resin is 11.17% higher than JB with vinylester resin. BG100 tensile strength value is the highest in samples prepared with both epoxy and vinylester resin. The difference between BG86 and BG100 tensile behavior is 1.6% for vinylester reinforced composite and 0.5% for epoxy reinforced composite samples. The results indicate that the use of epoxy resin instead of vinylester in basalt reinforced composite matrices increases the tensile

strength. In one of the searches about diverse resin usage [32], it is stated that the use of epoxy resin in the composite structure formed by using vinylester and epoxy resin with basalt fiber corresponds to a 29% increase in tensile strength. In another work [17], tensile strength values of 153.87 MPa and 106.902 MPa in the warp direction were obtained in the structure prepared in two different thicknesses, using Basalt and Jute fabrics as reinforcement elements and vinylester resin as matrix element. Considering, BG86 samples, the tensile strength of the samples made with epoxy resin increased by 12.46 % compared to composites with vinylester resin. This increase was not seen only in JB samples, which is thought to be due to sequencing order.

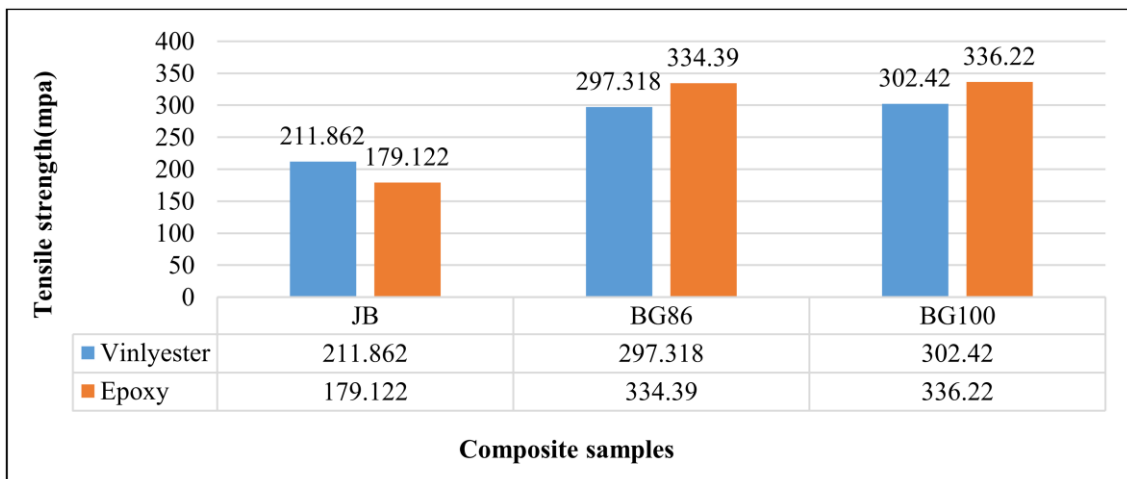
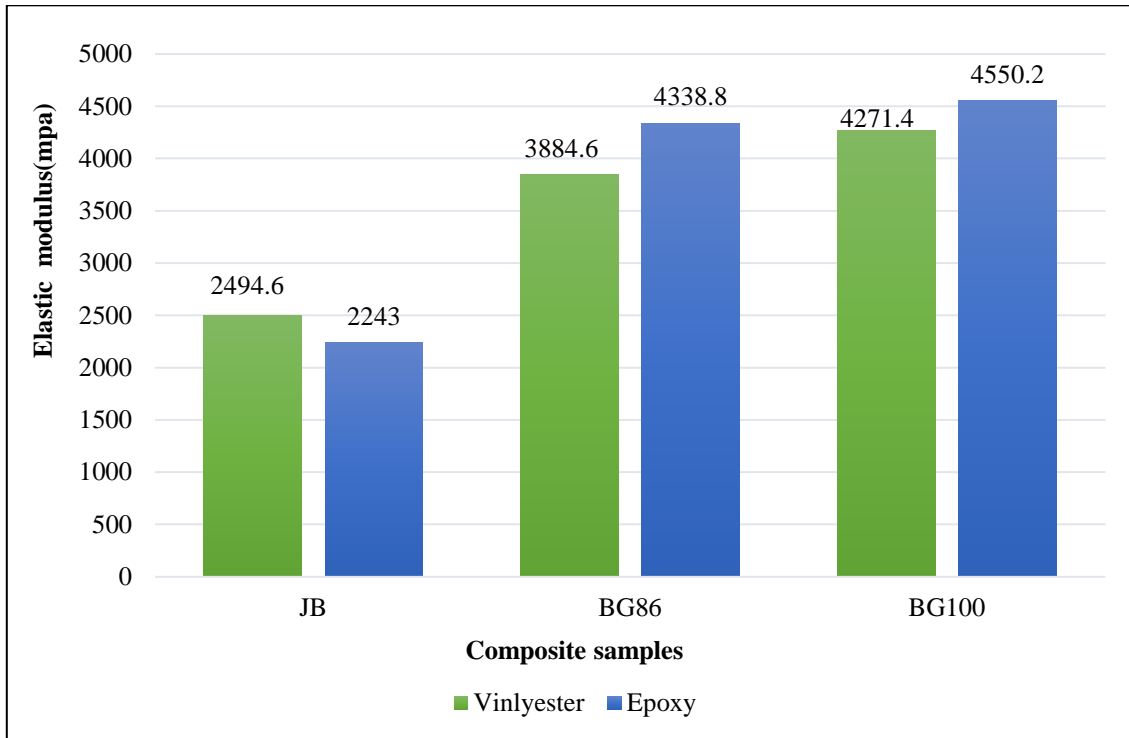


Figure 7. Tensile strength of produced samples

Figure 8 indicates the elastic modulus of produced composite samples. For instance, the difference of elastic modulus of BG100 epoxy and vinylester samples only 6.52%. This indicates that although two different resins are used in the linear region, a similar slope is observed, the curves diverge while increasing the applied load and present different tendencies. A similar trend is acceptable for BG86 epoxy and vinylester resin samples with a 12.8%

difference in elastic modulus. It is stated that this difference is due to the chemical structure of vinylester and epoxy resins, and that resin-fiber compatibility is better between epoxy and fabrics. In one of the researches about varied resin usage [32], the use of epoxy resin caused a 13.6% increase in elastic modulus compared to the use of vinylester resin.



**Figure 8.** Elastic modulus of composite samples

Figure 9 indicates elongation at the break of samples. Elongation at break is defined as the ratio between the changing length of the material after fracture and the initial length of the material. From the results,

BG100 vinylester composite sample has the lowest elongation at break among vinylester composite samples. Since BG100 sample has the highest tensile strength value, the amount of elongation has taken the lowest value in parallel with this.

JB epoxy composite sample has the lowest elongation value among the epoxy composite

samples. Since JB sample showed high compatibility with epoxy resin, and the elongation values were not high.

Because, one of the advantages of using epoxy resin is that it indicates low shrinkage during the curing process, with less than 5% shrinkage detected in epoxy resins, while up to 12% in volume reduction was found in vinyl ester resins [9]. This provides better mechanical properties in structures using epoxy resin.

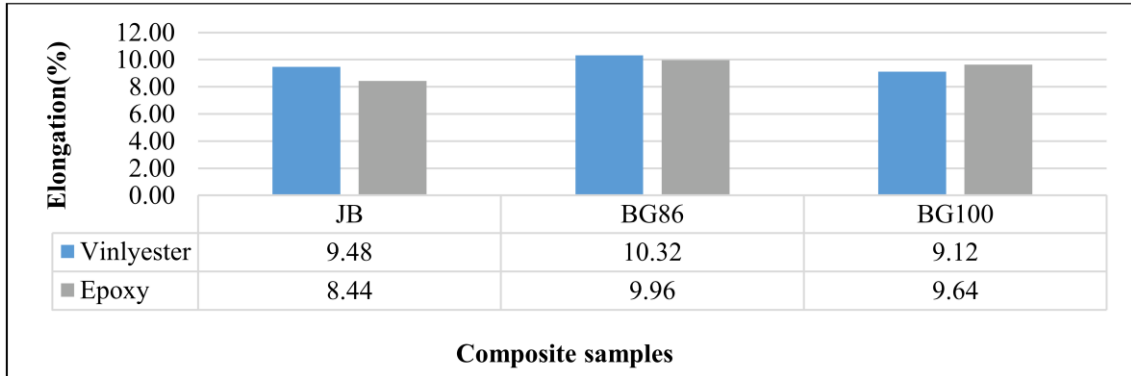


Figure 9. Elongation of composite samples

### 3.2. Hardness Test Analysis Results

According to Vickers Hardness test results, produced composite samples with epoxy resin have higher hardness values than produced samples with vinylester resin. When the results of the JB sample are investigated, the hardness value

produced with epoxy resin is 80.7% higher than the sample produced with vinylester resin. In the results of BG86 and BG100, the hardness value of samples using the epoxy resin is 64% and 39.9% higher than with samples using the vinylester resin, respectively.

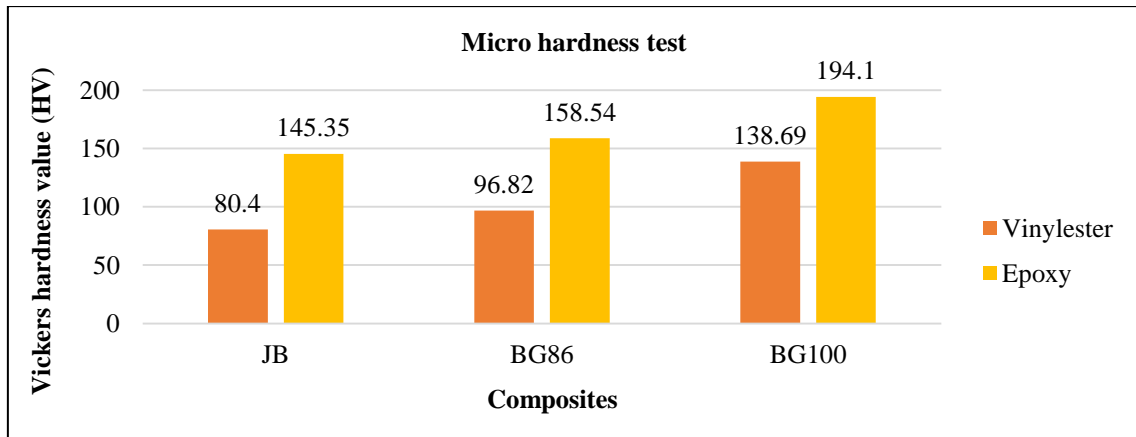


Figure 10. Vickers hardness test results

By the time the fiber fabrics used were viewed, it was understood that the hardness value of the samples made with 86 gr/m<sup>2</sup> glass fiber fabric and vinylester resin of the basalt fiber fabric was approximately 1.2 times higher than the hybrid composite sample made by the basalt fiber fabric with jute fiber fabric. The hardness value of the BG100 sample was found to be 1.43 times higher than the BG86 sample as a result of the comparison of the hardness value of the basalt

fiber fabric in hybrid composites produced with 86 gr/m<sup>2</sup> and 100 gr/m<sup>2</sup> glass fiber fabrics using vinylester resin. The difference between these BG86 and BG100 is associated with the fact that the mesh structure of the 100 gr/m<sup>2</sup> fabrics is more dense and stronger than the 86 gr/m<sup>2</sup> woven fabrics. The higher hardness value of the samples made with epoxy resin than the samples made with vinylester resin can be attributed to the better bonding of the chemical bonds of epoxy with fiber

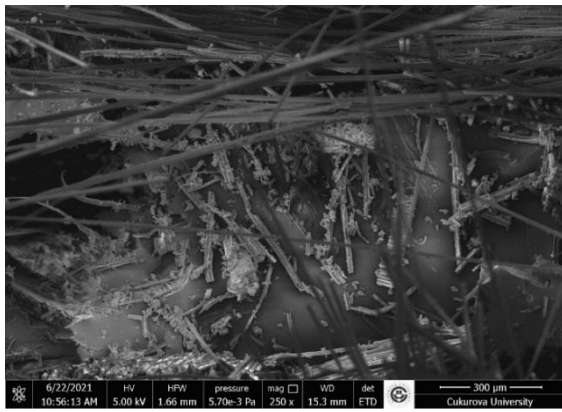
fabrics. The long chain molecules and polar groups in epoxy resin provide a stronger bond than the structure in vinylester resin. In the Shore hardness test performed in another study, the hardness value of the sample with the BGB (Basalt-Glass-Basalt) order was 36.6% higher than the hardness value of the sample in the GBG (Glass-Basalt-Glass) order. The difference in this hardness is due to the hardness of basalt rocks [24].

### 3.3. SEM Analysis Results

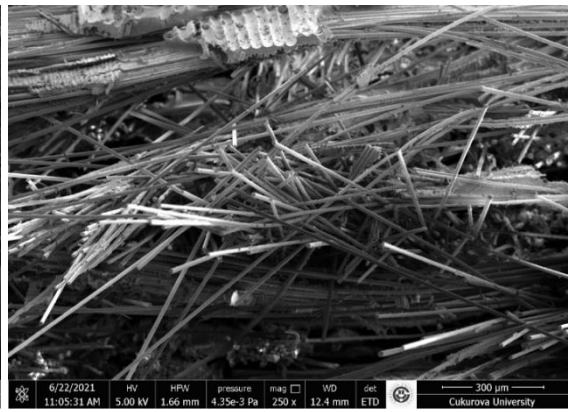
Figures 11a-f shows the morphological structure of the produced composites after the tensile test. In samples with more voids appearing on the surface as shown in Figure 11a-c, vinylester resin is the matrix element. It is understood from the images that the use of glass fiber instead of jute fiber strengthens the structure even more. As seen in

Figure 11d-f, less voids and more fiber breakage occurred in the composite samples produced with epoxy resin. This can be attributed to the improved tensile properties of BG100 produced with epoxy resin over other composites. In Figure 11e-f for BG86 and BG100 samples, minimal matrix cracking and less fiber splitting resulted in higher tensile absorption while also giving the samples high tensile strength values.

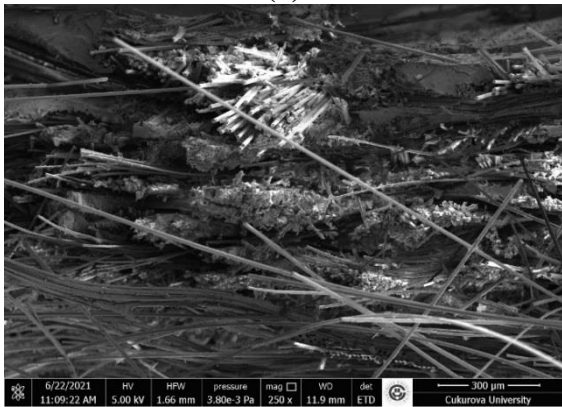
Because of the susceptible nature of the jute fiber, it is seen that there is some fiber breakage and a sharp cut in places due to the load on the surface of JB composites. The semi-brittle nature of the glass fiber and the fiber delamination and separation when the load is applied bring basalt fibers to the fore because they can withstand high tensile loads [13].



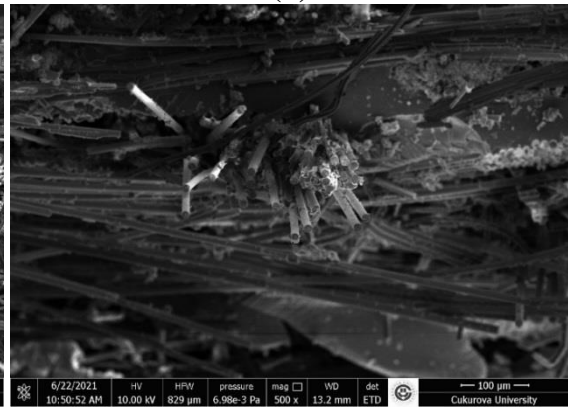
(a)



(b)

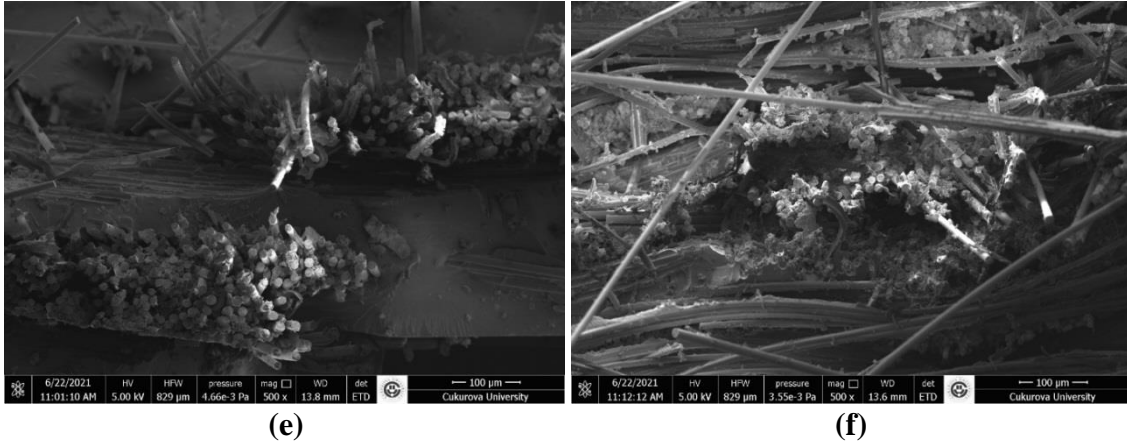


(c)



(d)





**Figure 11.** SEM images of a) JB Vinylester b) BG86 Vinylester c) BG100 Vinylester d) JB Epoxy e) BG86 Epoxy f) BG100 Epoxy

#### 4. CONCLUSION

The effects of hybridization and usage of different matrix materials on basalt fiber fabric/jute fiber fabric, basalt fiber fabric/glass fiber fabric (86 gr/m<sup>2</sup>), and basalt/glass fiber (100 gr/m<sup>2</sup>) on tensile strength and hardness have been evaluated experimentally. In general, the performance of epoxy matrix reinforced composites was superior to the vinylester reinforced composites. The results obtained from tensile test, the tensile strength of the composite material stacked with Basalt/Glass fiber (100 gr/m<sup>2</sup>) array is higher than the composites produced with epoxy matrix materials stacked with Basalt/Jute fiber and Basalt/Glass fiber array (86 gr/m<sup>2</sup>). When compared to vinylester matrix composites BG100 with the epoxy matrix is also the highest value among the other sample specimens. Also, the use of epoxy matrix in the BG86 sample was 12.46% compared to the vinylester resin, and this rate was 11.17% in the BG100 sample, and it was viewed that the tensile strength increased with the use of the epoxy matrix. According to the results of the applied tests, it can be deduced that the stacking order affects the tensile strength properties of hybrid composites. The tensile strength of JB samples with vinylester matrix is higher than that of JB samples with epoxy matrix, which may be due to the sequence difference. In terms of microhardness, BG100 with epoxy matrix usage is

39.9% higher than with vinylester matrix usage. This ratio is 64.05% for the BG86 sample and 80.78% for the JB sample. SEM shows delamination, fiber breakage, and stretching under tensile load with the use of epoxy and vinylester resin in the samples. Morphological structure examination is compatible with the mechanical results in the study. In hybrid composite materials, mechanical properties can be changed by changing the stacking order or by using different matrixes. In addition to this, more elaborated studies with different resin and material parameters are needed to take full benefit of the great strength and hardness features of the various hybrid configurations that can be formed with basalt, jute, and glass fibers.

#### 5. REFERENCES

1. Monaldo, E., Nerilli, F., Vairo, G., 2019. Basalt-Based Fiber-reinforced Materials and Structural Applications in Civil Engineering. *Composite Structures*, 214, 246–263.
2. Nayak, S.Y., Shenoy, S., Hameed Sultan, M.T., Kini, C.R., Seth, A., Prabhu, S., Safri, S.N.A., 2021. Effect of CNT-Based Resin Modification on the Mechanical Properties of Polymer Composites. *Frontiers in Materials*, 7, 1–14.
3. Sfarra, S., Ibarra-Castaneda, C., Santulli, C., Paoletti, A., Paoletti, D., Sarasini, F., Bendada, A., Maldague, X., 2013. Falling Weight



- Impacted Glass and Basalt Fibre Woven Composites Inspected Using Non-destructive Techniques. *Compos. Part B Eng.* 45, 601–608.
4. Prasath, K.A., Krishnan, B.R., 2013. Mechanical Properties of Woven Fabric Basalt/Jute Fibre Reinforced Polymer Hybrid Composites. *International Journal of Mechanical Engineering Robotics Research*, 2(4), 279-290.
  5. Andrew, J., Ramesh, C., 2015. Residual Strength and Damage Characterization of Unidirectional Glass-basalt Hybrid/Epoxy CAI Laminates. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40, 1695–1705.
  6. Balaji, K.V., Shirvanimoghaddam, K., Rajan, G.S., Ellis, A.V., Naebe, M., 2020. Surface Treatment of Basalt Fiber for Use in Automotive Composites. *Materials Today Chemistry*, 17, 100334.
  7. Abd El-Baky, M.A., Attia, M.A., Abdelhaleem, M.M., Hassan, M.A., 2020. Flax/basalt/E-glass Fibers Reinforced Epoxy Composites with Enhanced Mechanical Properties. *Journal National Fibers*, Ahead of Print, 1–15.
  8. Bijlwan, P.P., Prasad, L., Sharma, A., 2021. Recent Advancement in the Fabrication and Characterization of Natural Fiber Reinforced Composite: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 44, 1718–1722.
  9. Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., Valenza, A., 2015. A Review on Basalt Fibre and its Composite. *Composites Part B: Engineering*, 74, 74–94.
  10. Mishra, R., Jamshaid, H., Militky, J., 2017. Basalt Nanoparticle Reinforced Hybrid Woven Composites: Mechanical and Thermo-mechanical Performance. *Fibers Polymers*. 18, 2433–2442.
  11. Zareei, N., Geranmayeh, A., Eslami-Farsani, R., 2019. Interlaminar Shear Strength and Tensile Properties of Environmentally-friendly Fiber Metal Laminates Reinforced by Hybrid Basalt and Jute Fibers. *Polymer Testing*, 75, 205–212.
  12. Tóth, L.F., Sukumaran, J., Szébenyi, G., Kalácska, A., Fauconnier, D., Nagarajan, R., De Baets, P., 2020. Large-scale Tribological Characterisation of Eco-friendly Basalt and Jute Fibre Reinforced Thermoset Composites. *Wear*, 450–451, 203274.
  13. Sapuan, S.M., Aulia, H.S., Ilyas, R.A., Atiqah, A., Dele-Afolabi, T.T., Nurazzi, M.N., Supian, A.B.M., Atikah, M.S.N., 2020. Mechanical Properties of Longitudinal Basalt/woven-glass-fiber-reinforced Unsaturated Polyester-resin Hybrid Composites. *Polymers (Basel)*, 12, 1–14.
  14. Saleem, A., Medina, L., Skrifvars, M., Berglin, L., 2020. Hybrid Polymer Composites of Bio-based Bast Fibers with Glass, Carbon and Basalt Fibers for Automotive Applications-A Review. *Molecules*, 25(21), 4933.
  15. Petrucci, R., Santulli, C., Puglia, D., Nisini, E., Sarasini, F., Tirillò, J., Torre, L., Minak, G., Kenny, J.M., 2015. Impact and Post-impact Damage Characterisation of Hybrid Composite Laminates Based on Basalt Fibres in Combination with Flax, Hemp and Glass Fibres Manufactured by Vacuum Infusion. *Composites Part B Engineering*, 69, 507–515.
  16. Sarasini, F., Tirillò, J., Valente, M., Valente, T., Cioffi, S., Iannace, S., Sorrentino, L., 2013. Effect of Basalt Fiber Hybridization on the Impact Behavior Under Low Impact Velocity of Glass/basalt Woven Fabric/epoxy Resin Composites. *Composites Part A Applied Sciences Manufacturing*, 47, 109–123.
  17. Santosh Gangappa, G., Sripad Kulkarni, S., 2021. Experimentation and Validation of Basalt & Jute Fiber Reinforced in Polymer Matrix Hybrid Composites. *Materials Today Proceedings*, 38, 2372–2379.
  18. Jusoh, M.S.M., Yahya, M.Y., Hussein, N.I.S., 2016. The Effect of Fibre Layering Pattern in Resisting Bending Loads of Natural Fibre-based Hybrid Composite Materials. *MATEC Web of Conferences*, 39, 1–6.
  19. Dhiman, P., Sharma, H., 2021. Effect of Walnut Shell Filler on Mechanical Properties of Jute-basalt Hybrid Epoxy Composites. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4537–4541.
  20. Kishore, M., Amrita, M., Kamesh, B., 2021. Tribological Properties of Basalt-jute Hybrid Composite with Graphene as Nanofiller. *Materials Today: Proceedings*, 43, 244–249.
  21. Kishore, M., Amrita, M., Kamesh, B., 2021. Experimental Investigation of Milling on Basalt-jute Hybrid Composites with Graphene

- as Nanofiller. *Materials Today: Proceedings*, 43, 726–730.
22. Fiore, V., Scalici, T., Sarasini, F., Tirilló, J., Calabrese, L., 2017. Salt-fog Spray Aging of Jute-basalt Reinforced Hybrid Structures: Flexural and Low Velocity Impact Response. *Composites Part B Engineering*, 116, 99–112.
23. Ma, G., Yan, L., Shen, W., Zhu, D., Huang, L., Kasal, B., 2018. Effects of Water, Alkali Solution and Temperature Ageing on Water Absorption, Morphology and Mechanical Properties of Natural FRP Composites: Plant-based Jute vs. Mineral-based Basalt. *Composites Part B Engineering*, 153, 398–412.
24. Raajeshkrishna, C.R., Chandramohan, P., Saravanan, D., 2019. Effect of Surface Treatment and Stacking Sequence on Mechanical Properties of Basalt/glass Epoxy Composites. *Polymers and Polymer Composites*, 27, 201–214.
25. Fiore, V., Scalici, T., Badagliacco, D., Enea, D., Alaimo, G., Valenza, A., 2017. Aging Resistance of Bio-epoxy Jute-basalt Hybrid Composites as Novel Multilayer Structures for Cladding. *Composite Structures*, 160, 1319–1328.
26. Sánchez-Gálvez, V., Sancho, R., Gálvez, F., Cendón, D., Rey-de-Pedraza, V., 2020. High Speed Impact Performance of Basalt Fiber Reinforced Vinylester Composites at Room and Low Temperatures. *International Journal of Lightweight Materials & Manufacture*, 3, 416–425.
27. Jusoh, M.S.B.M., Ahmad, H.A.B.I., Yahya, M.Y., 2017. Indentation and Low Velocity Impact Properties of Woven E-glass Hybridization with Basalt, Jute and Flax Toughened Epoxy Composites. 2017 3<sup>rd</sup> International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET), 164–168.
28. Esnaola, A., Ulacia, I., Aretxabaleta, L., Aurrekoetxea, J., Gallego, I., 2015. Quasi-static Crush Energy Absorption Capability of E-glass/polyester and Hybrid E-glass-basalt/polyester Composite Structures. *Material and Design*, 76, 18–25.
29. ASTM D3039/D3039-M.2000. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Material, [www.astm.org](http://www.astm.org).
30. Jawaid, M., Thariq, M., Saba, N., 2019. Structural Health Monitoring of Biocomposites, Fibre-reinforced Composites and Hybrid Composites. Woodhead Publishing Series, 1<sup>st</sup> Edition, 246-256.
31. ASTM E92-17. 2017. Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. [www.astm.org](http://www.astm.org).
32. Colombo, C., Vergani, L., Burman, M., 2012. Static and Fatigue Characterisation of New Basalt Fibre Reinforced Composites. *Composites Structures*, 94(3), 1165–1174.

## Prefabrik Düşey Drenlerin Farklı Eşleme Yöntemleri ile Sayısal Analizi

Ufuk TUNÇ\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-9986-9456  
Hüseyin ÇOLAKOĞLU<sup>2</sup> ORCID 0000-0001-6804-0963  
Erdem ÜSTÜNAY<sup>3</sup> ORCID 0000-0002-9542-2016  
Abdulazim YILDIZ<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-6755-1902  
Baki BAĞRIAÇIK<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-1860-2881

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>2</sup>Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>3</sup>Çukurova Üniversitesi, Rektörlük, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, Adana

Geliş tarihi: 05.07.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: TUNÇ, U., ÇOLAKOĞLU, H., ÜSTÜNAY, E., YILDIZ, A., BAĞRIAÇIK, B., (2021). Prefabrik Düşey Drenlerin Farklı Eşleme Yöntemleri ile Sayısal Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 955-964.

### Özet

Yumuşak zeminler üzerine inşa edilen dolgularda zamana bağlı konsolidasyon oturmalarının dikkatli bir şekilde incelenmesi gereklidir. Bu tür zeminlerde konsolidasyon oturmalarını hızlandırmak için kil zemin içerisine prefabrik düşey drenler inşa edilir. Bu çalışma kapsamında, yumuşak zeminler içine inşa edilen düşey dren sistemlerinin farklı eşleme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizleri araştırılmıştır. Sayısal analizlerin doğruluğu literatürde yer alan büyük ölçekli konsolidometre deney sonuçları ile karşılaştırılarak kontrol edilmiştir. Deney düzeneği, sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis 2D bilgisayar programı ile modellenmiştir. Analizlerde farklı eşleme yöntemleri kullanılarak düşey drenler eksenel simetrik koşullardan düzlem şekil değiştirme koşullara dönüştürülmüştür. Modifiye cam kili modeli kullanılarak gerçekleştirilen analizler deneysel ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmış ve aralarında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, düşey dren sistemlerinin 2 boyutlu koşullarda analiz edilebilmesi için geliştirilen eşleme yöntemlerinin doğru sonuç verdiğini ve bu tür mühendislik uygulamaların analizlerinde tasarım mühendislerine önemli kolaylıklar sağlayacağını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Büyük ölçekli konsolidometre deneyi, Prefabrik düşey dren, Modifiye cam kili modeli, Sayısal analiz

---

\* Sorumlu yazar (Corresponding author): Ufuk TUNÇ, [tunc.ufuk@outlook.com](mailto:tunc.ufuk@outlook.com)

## **Numerical Analysis of Prefabricated Vertical Drain with Different Matching Methods**

### **Abstract**

Settlement problems arising from civil engineering structures built on soft soils should be carefully examined. There are some soil improvement methods to solve settlement problems on such soils. One of these methods is prefabricated vertical drains (PDD). Vertical drains are used to increase the consolidation speed and shorten the start-up time of the construction. Within the scope of the study, it was planned to compare the results of the laboratory and numerical analysis of vertical drain systems applied in soft soils. The results of large-scale consolidometer experiments conducted in the laboratory were obtained from a study in the literature. A series of analysis were performed for Modified Cam clay (MCC) using different matching methods with the help of the Plaxis 2D computer program based on the finite element method. As a result, it was understood that the analysis results were in a quality supporting the experimental results. For this reason, it is suggested that the matching methods used in such engineering applications will allow practical analysis using the two-dimensional finite element program.

**Keywords:** Large scale consolidometer test, Prefabricate vertical drain, Modify cam clay model, Numerical analysis

### **1. GİRİŞ**

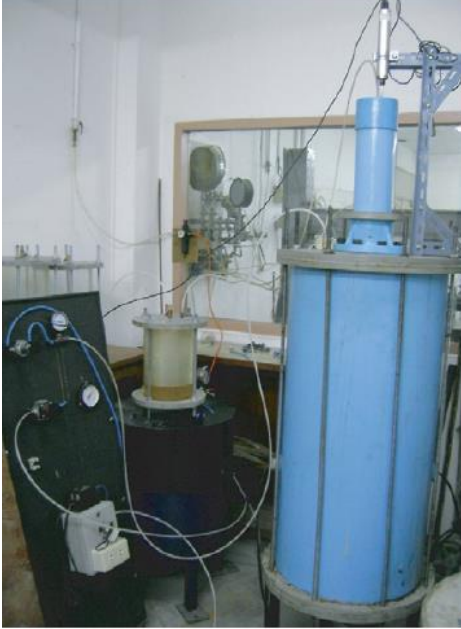
Normal konsolide veya az aşırı konsolide killer geoteknik mühendisliğinde sorunlu zeminler olarak tanımlanır. Bu özellikteki zeminler yumuşak karakterde olup gerek kayma dayanımları gerekse de konsolidasyon oturmaları yönünden önemli mühendislik problemlere neden olabilir. Özellikle yumuşak killerin permeabilitesinin düşük olması ve yüksek sıkışabilirliğe sahip olması nedeniyle konsolidasyon oturmalarının tamamlanması uzun yıllar sürebilir. Bu durumda boşluk suyu basınçlarının hızlı bir şekilde sönmülmesini sağlayarak konsolidasyon süresini kısaltmak için kil zemin içerisine düşey drenler inşa edilir. Günümüzde gerek imalat kolaylığı gerekse de ekonomik olması nedeniyle geosentetik malzemeden üretilen prefabrike düşey drenler (PDD) yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Dolgular genellikle pratik ve basit olması nedeniyle 2 boyutlu olarak düzlem şekil değiştirme koşullarda analiz edilir. Fakat dolgu altına inşa edilen PDD'ler, eksenel simetrik koşullarda analiz edilmesi gerekir. Bu nedenle dolguların sayısal analizinde PDD'lerin düzlem

şekil değiştirme koşullarına dönüştürülmesi gerekir. Hird ve arkadaşları [1], Indraratna and Redana [2], Chai ve arkadaşları [3] eksenel simetrik bir düşey drenin eş değer düzlem şekil değiştirme koşullarına dönüştürülmesi için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Bu yöntemlerde, düşey drenler arasındaki aralık ve/veya düşey dren etrafındaki zeminin permeabilitesi ayarlanarak sonlu elemanlar modeli eksenel simetriden düzlem şekil değiştirme koşullarına dönüştürülmektedir.

Saowapakpiboon ve arkadaşları [4] tarafından gerçekleştirilen çalışmada laboratuvar ortamında büyük ölçekli konsolidasyon düzeneğinde düşey dren davranışını incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçları, ABAQUS yazılımı ile 2 boyutlu modelleyerek sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada dolgu altında kil zemin içerisine inşa edilen PDD'lerin farklı eşleme yöntemleri kullanılarak Plaxis 2D yazılımı kullanılarak sayısal analizleri araştırılmıştır. Sayısal analizlerde zemin bünye modeli olarak Modifiye Cam Kili (MCC) modeli kullanılarak hesaplanan oturmalar ölçüm değerleri ile karşılaştırılarak farklı eşleme yöntemlerinin performansı araştırılmıştır.





Şekil 2. Büyük ölçekli konsolidometre deney düzeneği [4]

## 2.2. Zemin Bünye Modeli

Sayısal analizlerde yumuşak kil zemin davranışı için kritik durum teorisi çerçevesinde geliştirilmiş olan Modifiye Cam Kili (MCC) modeli kullanılmıştır. MCC modeli, kritik durum teorisi çerçevesinde geliştirilmiş elasto-plastik davranışı esas alan bir zemin bünye modelidir. MCC modelinde kullanılan zemin model parametreleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. MCC model temel parametreleri

Parametre	Açıklama
$\lambda$	Sıkışma indeksi
$\kappa$	Şişme indeksi
$e_{init}$	Başlangıç boşluk oranı
M	$p^*$ - q üzerindeki kritik durum çizgisi tanjantı
$\nu_{ur}$	Possion oranı
c	Kohezyon ( $kN/m^2$ )
$\phi$	Sürtünme Açısı ( $^{\circ}$ )
$\psi$	Dilatasyon Açısı ( $^{\circ}$ )
$k_{x,y}$	Permeabilite katsayısı (m/gün)

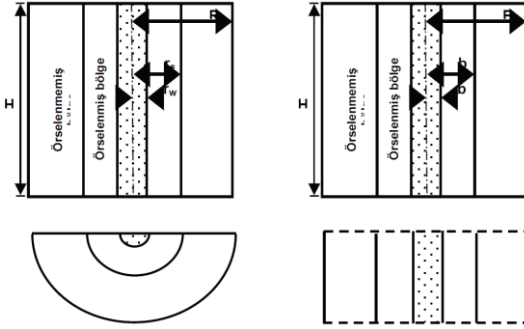
## 2.3. Düşey Drenlerin Sayısal Analizi

Son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisine paralel olarak geoteknik mühendisliğinde daha gerçekçi çözümler elde edebilmek için sayısal yöntemlerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır [5]. Sonlu elemanlar yöntemi, sayısal analiz yöntemlerinden en sistematik ve en etkin olanıdır. Bu özelliğiyle sonlu elemanlar yöntemi, farklı malzemelerden oluşan ve karmaşık geometriye sahip geoteknik problemlerin modellenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca bir eleman için yazılan denklem tüm sistem için kullanılabilir ve bu sayede sürekli bir ortam için ele alınan kısmi difrensiyel denklem takımına indirgenerek çözülmektedir [6].

Bu çalışmadaki sayısal analizlerde sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir yazılım olan PLAXIS (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) [7] paket programı kullanılmıştır. PLAXIS, geoteknik mühendisliğindeki stabilite ve deformasyon problemlerinin analiz edilebilmesi için tasarlanmış bir yazılımdır. İlk aşamada laboratuvarında gerçekleştirilen büyük ölçekli konsolidometre deneyi PLAXIS programı ile modellenerek eksenel simetrik koşullarda analiz edilmiştir. Analizlerde zamana bağlı oturmalar MCC modeli ile hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar deneysel ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak analizlerin doğruluğu ortaya konmuştur. İkinci aşamada ise silindirik geometriye sahip deney düzeneği ve PDD eleman farklı eşleme yöntemleri ile düzlem deformasyon koşullara dönüştürülerek analiz edilmiştir. Bu analiz sonuçları ölçüm değerleri ile karşılaştırılarak eşleme yöntemlerinin ne kadar güvenilir olduğu araştırılmıştır.

Dolgu altına inşa edilen düşey drenlerin iki boyutlu koşullarda sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmesi oldukça zordur. Çünkü silindirik geometriye sahip düşey drenlerin düzlem şekil değiştirme koşullara dönüştürülmesi gerekir. Bu tür problemlerin üç boyutlu analizinin yapılması daha doğru bir yöntemdir. Ancak üç boyutlu analizlerde çok fazla işlem gerektirmesi ve bununla birlikte daha fazla zamana ihtiyaç duyulması nedeniyle bu yaklaşım pratik uygulamalar için çok fazla tercih edilmemektedir.

Bundan dolayı, düşey drenlerin iki boyutlu analizi yapılırken uygun bir eşleme yöntemi ile düşey drenlerin düzlem şekil değiştirme koşullara dönüştürülmesi gerekir [8].



Şekil 3. Birim hücre modeli; eksenel simetrik (solda), düzlem deformasyon (sağda) [8]

Literatürde bu konuda oldukça fazla araştırma bulunmaktadır. Indraratna ve arkadaşları [2] tarafından önerilen eşleme yönteminde düşey drenler için eksenel simetrik geometriden düzlem şekil değiştirme koşullara dönüştürmede model geometrisi korunarak eşleme için permeabilite değerleri kullanılmıştır (Eşitlik 1-2).

$$n = \frac{d_e}{d_s} \quad (1)$$

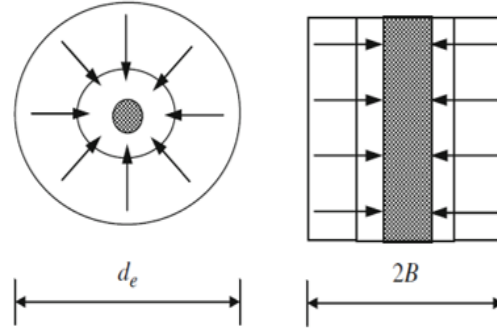
$$\frac{k_{hp}}{k_h} = \frac{0,67}{\left[ \ln(n) - 0,75 \right]} \quad (2)$$

Bu bağıntıda k<sub>hp</sub>; düzlem şekil değiştirme koşullardaki permeabilite değeri, k<sub>h</sub>; zeminin doğal yatay permeabilitesi, d<sub>e</sub>; drenin etki bölgesinin çapı ve d<sub>w</sub>; eşdeğer dren çapıdır.

Hird ve arkadaşları [1] tarafından önerilen eşleme yönteminde birim hücre yöntemi kullanılarak eşleme için permeabilitenin değişmediği kabul edilir ve geometrik uygunluk aşağıdaki bağıntı ile dikkate alınır (Eşitlik 3).

$$\frac{B}{R} = \left\{ \left( \frac{3}{2} \right) \left[ \ln \left( \frac{R}{r_s} \right) + \left( \frac{k_h}{k_s} \right) \ln \left( \frac{r_s}{r_w} \right) - \frac{3}{4} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Yukarıdaki bağıntıda, B; düzlem şekil değiştirme koşullarındaki birim hücrenin genişliğinin yarısı, R; eksenel simetrik birim hücrenin yarıçapı, k; zeminin doğal yatay permeabilitesi, k<sub>s</sub>; örselenmiş bölgedeki yatay permeabilitesi, r<sub>w</sub>; drenin yarıçapı, r<sub>s</sub>; örselenmiş bölgenin yarıçapıdır.



Şekil 4. Birim hücre modeli; eksenel simetrik (solda), düzlem deformasyon (sağda) [2]

Hird ve arkadaşları [1] tarafından önerilen başka bir yöntem ise, Indraratna ve Redana [2] yöntemine benzer bir yaklaşımla model geometrisi değiştirilmeden eşleme için permeabilite değerleri aşağıdaki bağıntı yardımıyla dönüştürülür (Permeabilite eşleme yöntemi) (Eşitlik 4).

$$\frac{k_{pl}}{k_{ax}} = \frac{2}{3 \left[ \ln \left( \frac{R}{r_s} \right) + \left( \frac{k_{ax}}{k_s} \right) \ln \left( \frac{r_s}{r_w} \right) - \frac{3}{4} \right]} \quad (4)$$

Burada k<sub>pl</sub>; düzlem şekil değiştirme koşullardaki permeabilite değeri, k<sub>ax</sub>; eksenel simetrik koşullardaki permeabilite değeridir.

Chai ve arkadaşları [3] tarafından ise düşey drenlerin etkisini modellemek için basit bir eşleme yöntemi geliştirilmiştir. Düşey drenler ve zemin davranışı esas alınarak tüm model homojen kompozit bir malzemeye dönüştürülmektedir. Model geometrisi korunarak eşleme için düşey permeabilite değerleri eş değer düzlem şekil değiştirme koşullara aşağıdaki bağıntıyla dönüştürülür (Basit yöntem) (Eşitlik 5 ve 6).



$$\mu = \ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{k_h}{k_s} \ln(s) - \frac{3}{4} + \frac{2\pi l^2 k_h}{3q_w} \quad (5)$$

$$k_{ve} = \left(1 + \frac{2,5l^2 k_h}{\mu d_e^2 k_v}\right) k_v \quad (6)$$

Bu bağıntıda,  $l$ ; düşey drenin boyu ve  $k_{ve}$ ; eşdeğer düşey permeabilite değeridir. Bu eşleme yönteminin en önemli kolaylığı dönüşüm yapıldığı takdirde modelde düşey drenleri tanımlamaya gerek duyulmadan düşey drenlerin etkisinin düşey permeabiliteye yansıtılmasıdır.

#### 2.4. Zemin Özellikleri ve Deneysel Prosedürleri

Saowapakpiboon ve arkadaşları [4] tarafından laboratuvar ortamında gerçekleştirilen büyük ölçekli konsolidometre deneyinde kullanılan yumuşak kil zemine ait endeks özellikler Çizelge 2’de görülmektedir. Konsolidometre deneyinde CeTeau firması tarafından üretilen CT-D911 modeli PDD malzemesi kullanılmıştır. PDD malzemenin özellikleri Çizelge 3’te özetlenmiştir [4].

**Çizelge 2.** Yumuşak Bangkok kilinin endeks özellikleri [4]

Fiziksel Özellik	Değer
Likit limit (%)	102,24
Plastik limit (%)	39,55
Su muhtevası (%)	112,69
Plastisite indeksi	62,69
Birim hacim ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )	14,70
Özgül ağırlık	2,66

**Çizelge 3.** CeTeau CT-D911 dreninin özellikleri [4]

Ağırlık (g/m)	78
Genişlik, W(mm)	100
Kalınlık, t <sub>d</sub> (mm)	3,5

Zemin numuneleri konsolidometreye konulmadan önce sürtünmeyi azaltmak için konsolidometrenin içerisi yağlanmıştır. Daha sonra zemin numuneleri,

su içeriği likit limit değerinin üstünde bir su muhtevasında hazırlanmış ve mekanik bir karıştırıcıda iyice karıştırılarak tabakalar halinde konsolidometre içerisine yerleştirilmiştir. Son olarak 50 kPa’lık bir düşey ilave basınç altında konsolide edilmiştir. Bu esnada konsolidometrede her iki yönde drenaja müdahale edilerek Asaoka [9] yöntemine göre konsolidasyon derecesi %90’lara ulaşana kadar bekletilmiştir. Bu şekilde hazırlanan kil numunelerin kalınlığı yaklaşık 0,7 m olarak ölçülmüştür [4].

PDD malzeme, 81.9 mm genişliğinde ve 18.2 mm kalınlığında bir mini-mandrel (kesit alanı 44 mm eşdeğer çapa sahip) yardımıyla konsolidometre içerisindeki kil zemine itilerek yerleştirilmiştir. Ardından konsolidasyon deneyi için zemine düşey yönde 100 kPa konsolidasyon basıncı uygulanarak zamana bağlı oturmalar ölçülmüştür (ilave düşey basınç artışı 50 kPa). Konsolidasyon deneyi sırasında sadece üst yüzeyde drenaja izin verilmiş olup alt yüzey drenaja kapatılmıştır [4].

Sayısal analizlerde kullanılan MCC zemin model parametreleri laboratuvar deney sonuçlarından belirlenmiş olup Çizelge 4’te listelenmiştir. PDD elemana ait parametreler ise Çizelge 5’te verilmiştir. Bu tabloda listelenen  $d_s$  değeri, model mandrelin kesit alanının eşdeğer çapının yaklaşık iki katıdır.

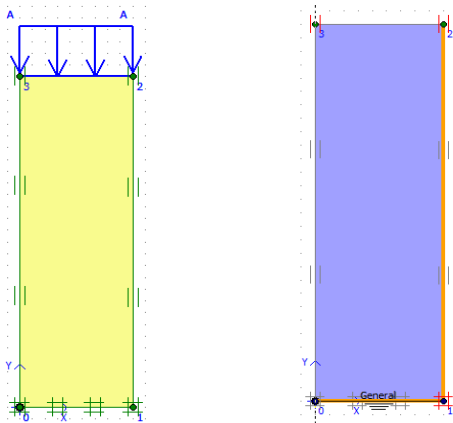
**Çizelge 4.** MCC model parametreleri

Parametre	Değer
$\lambda$	0,569
$\kappa$	0,052
$e_{init}$	2,29
$M$	0,8
$v_{ur}$	0,3
$c$	1 kN/m <sup>2</sup>
$\varphi$	20,67°
$\Psi$	0°
$k_{x,y}$	9,0x10 <sup>-5</sup> m/gün
$K_{0,nc}$	0,647

Çizge 5. PDD konsolidasyonu için parametreler [4]

Parametre	Sembol	Değer
Dren çapı (m)	$d_w$	0,0268
Örselenmiş bölge çapı (m)	$d_s$	0,087
$k_h$ 'nin $k_s$ 'a oranı	$k_h/k_s$	3
$k_h$ 'nin $k_v$ 'a oranı	$k_h/k_v$	1,5
$k_v$ 'nin $k_s$ 'a oranı	$k_h/k_s$	3

Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli sistemlerin matematiksel olarak tanımlanması ile oluşan bir çözüm yöntemidir. Belirlenen bölgenin eleman adı verilen alt bölgelere ayrılması ve elemanların düğüm noktaları (node) ile ilişkilendirilerek çözüm bölgesi sonlu elemanlar ağına dönüştürmesi, sonlu elemanlar yöntemini diğer sayısal yöntemlerde ayıran en önemli özelliğidir [6]. Bu çalışmada sonlu elemanlar ağı Plaxis 2D programında Medium Mesh (orta ağ) seçilerek oluşturulmuştur. Plaxis 2D programında, sonlu elemanlar yöntemine göre yapılan analizde ilk aşamada PDD'nin etkisini modellemek için eksenel simetrik koşullarda analizler gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise deney düzeneği düzlem şekil değiştirme koşullara 3 farklı eşleme yöntemi ile dönüştürülerek analiz edilmiştir. Modelde sınır koşulları, alt sınır yer değiştirmelere iki yönde de izin verilmemektedir ( $u_x=u_y=0$ ). Sağ ve sol kenarlar yatay yer değiştirmelere izin vermemektedir ( $u_x=0$ ) (Şekil 5.a). Sağ ve alt kenar drenaja kapatılmış ve yer altı su seviyesi alt sınırdan tanımlanmıştır (Şekil 5.b).

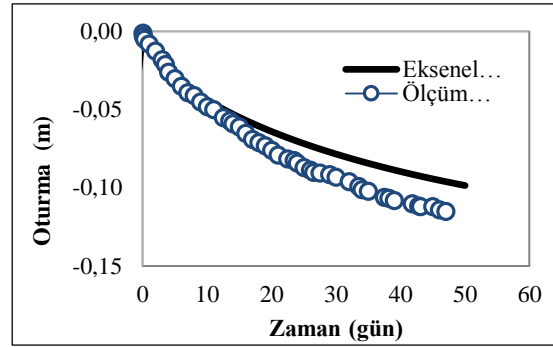


a) Geometrik model b) Başlangıç koşulları  
Şekil 5. Deneyin PLAXIS 2D programında modellenmesi

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sayısal analizlerde farklı eşleme yöntemleri ile düzlem şekil değiştirme koşullara dönüştürülen düşey drenlerin zamana bağlı davranışı eksenel simetrik analiz ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analizlerde kil zemin davranışı için elasto-plastik Modifiye Cam Kili (MCC) modeli kullanılmıştır.

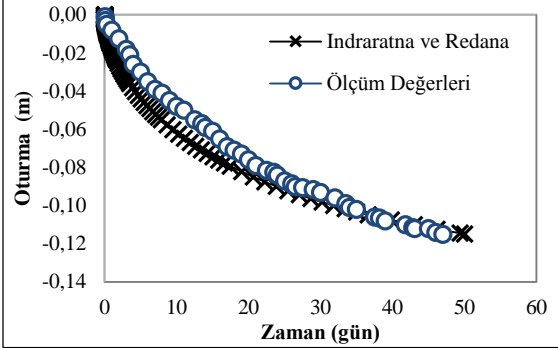
İlk aşamada eksenel simetrik geometriye sahip deney düzeneği 2 boyutlu eksenel simetrik koşullarda analiz edilerek deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Deney verileri ile eksenel simetrik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

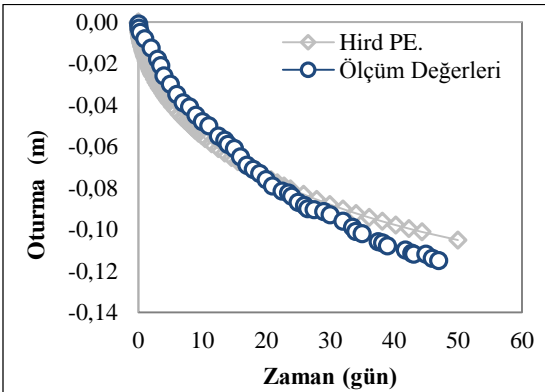
MCC zemin modeli ve eksenel simetrik koşullarda analizde zamana bağlı oturma değeri 50. günün sonunda 100 mm olarak elde edilmiştir. Ölçüm sonuçlarında 50. günün sonunda yaklaşık 115 mm olarak belirlenmiştir. Deney ve analiz sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan düşey drenli yumuşak kilin konsolidasyon davranışının MCC model ile PLAXIS programında başarılı şekilde modellendiği görülmüştür.

Sayısal analizlerin ikinci aşamasında ise eksenel simetrik geometriye sahip deney düzeneği farklı eşleme yöntemleri kullanılarak 2 boyutlu düzlem şekil koşullara dönüştürülmüştür. İlk olarak düşey drenler, Indraratna ve Redana [2] tarafından önerilen eşleme yöntemine göre düzlem gerilme koşullara dönüştürülmüş ve analiz edilmiştir. Deney verileri ve bu eşleme yöntemi ile elde edilen analiz sonuçları Şekil 7'de karşılaştırılmıştır.

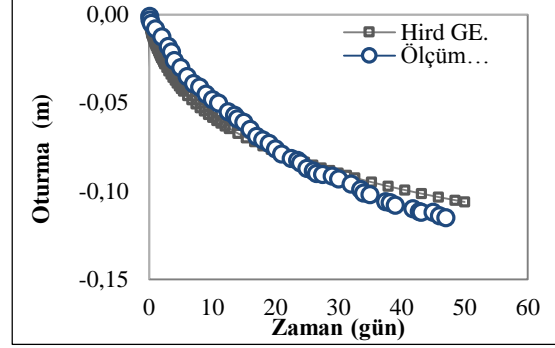


Şekil 7. Indraratna ve Redana eşleme yöntemi analiz sonuçları

Indraratna ve Redana [2] tarafından önerilen eşleme yöntemi ile 50. günün sonunda 110 mm oturma değeri hesaplanmıştır. Deneysel ölçüm sonuçlarına yakınlığı ve uygunluğunun çok iyi olduğu görülmektedir. Daha sonra deney düzeneği Hird ve arkadaşları [1] tarafından önerilen permabilite ve geometri eşleme yöntemleri kullanılarak düzlem deformasyon koşullara dönüştürülmüştür. Şekil 8 ve 9'da Hird ve arkadaşları [1] tarafından önerilen permabilite ve geometri eşleme yöntemleri kullanılarak elde edilen analiz sonuçları görülmektedir. Analiz sonuçlarının deney verileri ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Her iki eşleme yöntemi de yaklaşık aynı sonuçları vermektedir. 50. günün sonunda yaklaşık 110 mm oturma değeri elde edilmiştir. Bu eşleme yöntemlerinin deney verileri ile olan uyumlarından doğru sonuç verdiği görülmüştür.

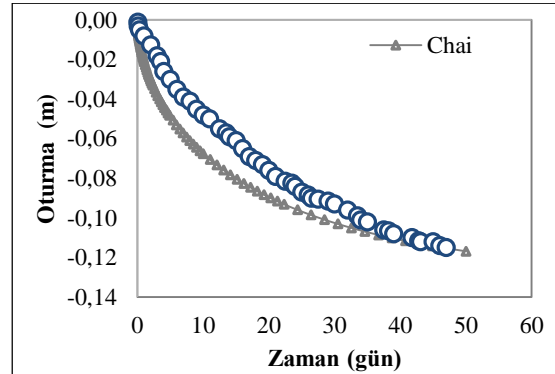


Şekil 8. Hird permabilite eşleme yöntemi analiz sonuçları



Şekil 9. Hird geometri eşleme yöntemi analiz sonuçları

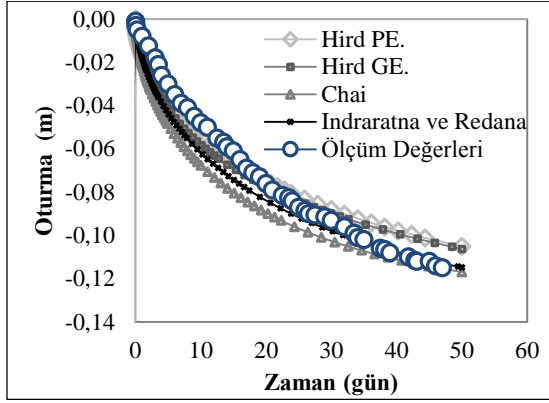
Son olarak deney düzeneği Chai ve arkadaşları [3] tarafından önerilen eşleme yöntemi (basit yöntem) ile düzlem şekil değiştirme koşullara dönüştürülmüştür. Deney verileri ile analiz sonuçları Şekil 10'da karşılaştırılmıştır. Chai ve arkadaşları [3] (basit yöntem) tarafından geliştirilen yöntem ile 50. günün sonunda 120 mm oturma değeri hesaplanmıştır. Bu yöntem ile hesaplanan zamana bağlı oturmaların ölçüm sonuçlarına uygunluğu iyi olmakla birlikte diğer yöntemlerle kıyaslandığında biraz uzak kalmıştır.



Şekil 10. Chai (basit yöntem) eşleme yöntemi analiz sonuçları

Şekil 11'de ise bu araştırma kapsamında kullanılan tüm eşleme yöntemlerine ait sonuçlar toplu olarak deneysel ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tüm eşleme yöntemlerinin deney sonuçları ile uyum içerisinde olduğu fakat ölçüm sonuçlarına göre bir miktar farklılıklar görülmektedir. Bunun nedeni olarak eşleme yöntemlerinde zemin

davranışının lineer elastik kabul edilmesi gibi bazı basitleştirici kabullerin yapılması gösterilebilir.



Şekil 11. MCC zemin modelinde yapılan analizlerin sonuçları

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yumuşak kil zeminlerde inşa edilen düşey dren sistemlerinin 2 boyutlu koşullarda düzlem deformasyon koşullarına dönüştürülmesi için geliştirilen farklı eşleme yöntemlerinin uygulanabilirliği deneysel ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak araştırılmıştır. Sayısal analizlerde PLAXIS 2D V8.6 programı kullanılmıştır. Düşey drenlerin aksel simetrik koşullardan düzlem şekil değiştirme koşullarına dönüştürülmesi için Indraratna, Hird ve Chai tarafından geliştirilen 3 farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerin doğruluğunu araştırmak için Saowapakpiboon et arkadaşları [4] tarafından laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen büyük ölçekli konsolidometre deney sonuçları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Düşey drenli olarak gerçekleştirilen büyük ölçekli laboratuvar deney sonuçları ile kıyaslandığında üç farklı eşleme yöntemi ile hesaplanan oturma-zaman grafikleri ile deney sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarına en yakın sonuçları veren eşleme yönteminin Indraratna ve Redana yöntemi olduğu görülmüştür. Chai yönteminde ise diğer 2 eşleme yöntemine göre uyum biraz daha uzak elde edilmiştir. Fakat Chai yönteminin çok daha basit bir yöntem olması, düşey drenlerin modellenmesine gerek olmaması

nedeniyle uygulamada tasarımcılar için daha ideal bir yöntemdir. Ayrıca bu eşleme yöntemleri geliştirilirken zemin davranışı lineer elastik kabul edilmektedir. MCC gibi elasto-plastik zemin modeli kullanıldığında sonuçlara önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Hird, C.C., Pyrah, I.C., Russell, D., 1992. Finite Element Modeling of Vertical Drains Beneath Embankments on Soft Ground. *Géotechnique*, 42, 499-511.
2. Indraratna, B., Redana, I.W., 1998. Laboratory Determination of Smear Zone Due to Vertical Drain Installation. *J. Geotech. and Geoenvironmental Engineering*, 124, 180-184.
3. Chai, J. C., and Miura, N., 1999. Investigation of Factors Affecting Vertical Drain Behavior. *J. Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE*, 125(3), 216-226.
4. Saowapakpiboon, J., Bergado, D. T., Voottipruex, P., Lam, L. G., Nakakuma, K. 2011. PVD Improvement Combined with Surcharge and Vacuum Preloading Including Simulations. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(1), 74-82.
5. Şengün, E., 2013. Oyuk Genişlemesi Probleminin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İki Boyutlu Sayısal Analizi. İstanbul Teknik Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 85.
6. Zienkiewicz, O.C., 1977. *The Finite-Element Method*. 3<sup>rd</sup> ed., New York, McGraw-Hill Book Co., 787.
7. Brinkgreve R. B. J., 2002. *Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analysis*. 2d Version 8.2.
8. Yıldız, A., 2007. Düşey Drenlerin Sayısal Analizi. 2. Geoteknik Sempozyumu, Kasım 2007, Çukurova Üniversitesi, Adana.
9. Asaoka, A., 1978. Observational Procedure of Settlement Prediction. *Soils and Foundations*, 18(4), 87-101.
10. *Plaxis V.8 Material Models Manual*, 2008.
11. Das, B.M., 1995. *Advanced Soil Mechanics*. Mc. Graw-Hill Book Company, New York, U.S.A, 567.

12. Keskin, M.S., 2009. Güçlendirilmiş Kumlu Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin Deneysel ve Teorik Analizi. Çukurova Üniversitesi, Doktora Tezi, Adana, 377.
13. Brinkgreve, R.B.J., Broere, W., Waterman, D., 2006. Plaxis, Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. Users Manual. The Netherlands.
14. Durmuş, C., 2019. Taş Kolonlar ile İyileştirilen Yumuşak Killerin Deformasyon ve Göçme Davranışı. İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 166.
15. Brinkgreve, R.B.J., Broere, W., Waterman, D., 2011. Plaxis 2D- 2011 Material Models Manual. Delft University of Technology & PLAXIS b.v., The Netherlands.

## Aerodynamic Analysis of Onshore Commercial Large Scale Wind Turbine

Akım İLHAN<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-3590-5291  
Mehmet BİLGİLİ<sup>2</sup> ORCID 0000-0003-5339-6120  
Melih SARI<sup>3</sup> ORCID 0000-0003-4148-2926  
Beşir ŞAHİN<sup>\*3</sup> ORCID 0000-0003-0671-0890

<sup>1</sup>Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Energy Systems Engineering Department, Ankara

<sup>2</sup>Cukurova University, Ceyhan Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Adana

<sup>3</sup>Cukurova University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Adana

Geliş tarihi: 26.07.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: İLHAN, A., BİLGİLİ, M., SARI, M., ŞAHİN, B., (2021). Aerodynamic Analysis of Onshore Commercial Large Scale Wind Turbine. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 965-977.

### Abstract

In this study, the variations of yearly aerodynamic characteristics of horizontal axis wind turbines operating in an installed wind power plant (WPP) in detail was revealed by means of the blade element momentum theory and angular momentum theory. For this aim, five identical wind turbines of the three-bladed type having rated power of 2 MW located in an installed wind farm in Hatay province of Turkey were selected. According to the results obtained from horizontal axis wind turbines having rated power of  $P_r=2$  MW, annual average turbine mechanical power output ( $P$ ), power coefficient ( $C_p$ ), free-stream wind speed ( $U_\infty$ ), and turbine rotor rotational speed ( $\Omega$ ) were obtained as 672.68 kW, 30.80%, 8.49 m/s and 12.81 rpm, respectively. Moreover, annual average axial flow induction factor ( $a$ ), thrust coefficient ( $C_T$ ), thrust force ( $T$ ) and blade tip speed ratio ( $\lambda$ ) were calculated as 0.10, 0.34, 75.18 kN and 6.57, respectively.

**Keywords:** Aerodynamic characteristics, Blade element momentum theories, Energy analysis

### Kara Tipi Ticari Büyük Ölçekli Rüzgâr Türbininin Aerodinamik Analizi

#### Öz

Bu çalışmada, kurulu bir rüzgâr santralinde (RES) çalışan yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin yıllık aerodinamik özelliklerinin değişimleri kanat elemanı momentum teorisi ve açıl momentum teorisi yardımıyla detaylı olarak ortaya konmuştur. Bu amaçla, Türkiye'nin Hatay ilinde kurulu bir rüzgâr çiftliğinde yer alan, anma gücü 2 MW olan üç kanatlı tipte beş özdeş rüzgâr türbini seçilmiştir. Yatay

eksenli rüzgar türbinlerinden elde edilen sonuçlara göre; anma gücü  $P_r=2$  MW, yıllık ortalama türbin mekanik güç çıkışı ( $P$ ), güç katsayısı ( $C_p$ ), serbest-akım rüzgar hızı ( $U_\infty$ ) ve türbin rotor dönüş hızı ( $\Omega$ ) değerleri, sırasıyla, 672,68 kW, %30,80, 8,49 m/s ve 12,81 rpm olarak elde edilmiştir. Ayrıca, yıllık ortalama aksenal akış indüksiyon faktörü ( $a$ ), itme katsayısı ( $C_T$ ), itme kuvveti ( $T$ ) ve kanat ucu hız oranı ( $\lambda$ ) değerleri, sırasıyla, 0,10, 0,34, 75,18 kN ve 6,57 olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aerodinamik karakteristikler, Kanat elemanı momentum teorisi, Enerji analizi

## 1. INTRODUCTION

Energy is one of the most essential and indispensable requirements of the present World. Besides, energy unquestionably has a necessary item in terms of the technological developments of countries, economic progress, and, most importantly, withal in human life [1-2]. In recent years, global energy demand which is developing in parallel with the developing technology, population growth, and rapid depletion of fossil fuels, has demonstrated a significant increase [3-6]. The increase in energy consumption is especially based on some factors such as population growth, the continuous improvement of the living standards, and the industrialization of the developing countries. By reaching the year 2030, a 21% increase in the total energy demand is unfortunately expected. Also nowadays, issues such as climate change-related concerns, alternative energy production sources, greenhouse gas emissions and reducing of the environmental other negative impacts related to fossil fuels, have become the most critical problems of the whole governments, and in order to tackle these urgent problems directly which occur recently, such topics are evaluated within the scope of the leading responsibilities of the World states.

The fact that energy generation, today, is not very economical, the utilization of energy causing negative environmental factors, and steadily increasing energy demand of mankind have effectuated some troubles in the sustainable energy demand. Current demand for energy, when evaluated in terms of a broad perspective such as economic, environmental, climate and human needs, it unfortunately becomes unsustainable. On the other hand, in order to provide that  $CO_2$  emissions which occur during energy production

remain within the specified limits, prominence should be given primarily to renewable energy sources [7-8].

There is a functional relationship between wind speed and power output considering the power generation which is caused by the interaction that occurred between the wind and the wind turbine, and it is quite essential to handle wind turbine aerodynamic parameters within this scope. The forces that the wind acts on the rotor cause periodic and fluctuating aerodynamic forces on the rotor. These effects demonstrate an increase by means of turbulence and dynamic influences [9]. Within this scope, the specifications belonging to the aerodynamic performance of the wind turbines in a considered region are required to be well understood. In the evaluation of aerodynamic performances of wind turbines, sufficient knowledge for average wind conditions, wind turbulence and wind events, is needed. For a considered region, within the scope of appropriate wind turbine selection or its design, a detailed evaluation of this information is essential. Besides, within the scope of the declaration of the energy efficiency of wind energy systems and their price effectiveness, performance analysis is required. In the context of providing proper level management of wind turbines, obtaining their control and operations, examining of optimum wind speed and turbine aerodynamic characteristics are relatively important. Accordingly, aerodynamic characteristics belonging to the wind turbine are pretty influential on the issues such as in the evaluation of the turbine performance, in the determination of preventive maintenance and operating factors and on the optimizations of these factors, in the constitution of cut-in and cut-out functions, in the best supply of turbine management



and administration, in the acquisition of the best provision of the wind turbine propulsion, in the forecastings belonging to power generation, and as well in the determinations of system life [10-13].

Many studies are found in the literature regarding the aerodynamic parameters of wind turbines [14-23]. But, there is a limited number of related studies considering the performance and aerodynamic characteristics of commercial large-scale wind turbines. Among them, İlhan et al. [24] examined the aerodynamic characteristics of 2 MW capacity commercial large scale wind turbine. In this study, they considered the measured data of an onshore operating wind farm in Turkey. They conducted the tip-speed ratio as 7.12 in the most productive wind turbines. Besides, the maximum power coefficient at the tip-speed ratio was reported to be 30%. On the other hand, Bilgili and Yasar [25] performed a study of efficiency analysis of a 2 MW horizontal axis wind turbine operating in an onshore wind farm in Turkey. In this study, they reported the maximum power coefficient as 30%, maximum thrust force as 140 kN, and optimum tip-speed ratio as 7. Furthermore, Cooney et al. [26] exhibited a performance analysis on 850 kW of a commercial large-scale wind turbine located in Ireland. Also in this study, they proposed the conducted results can be handled in the assessment of the future wind farms projects in terms of economy and technical feasibility. Sedaghat and Mirhosseini [27] studied the aerodynamic investigation of a 300 kW commercial wind turbine installed in Semnan province. Wind turbine characteristics including power coefficient, thrust coefficient, angle of attack, drag and lift coefficients, angle of the relative wind, axial and angular induction factors were calculated in their study by the method of blade element momentum theory. Taner [28] performed an economic analysis of a wind power plant located in the Cappadocia region of Turkey. The escalation method of inflation was considered in this study. Besides, it was determined that a 3 MW wind power plant can be constructed in this region. The results also indicated that due to the high-energy wind potential of this region, the construction of an energy plant in this region could be economical.

In this study, by utilizing the blade element momentum and angular momentum theories, the aerodynamic characteristics of the horizontal axis wind turbines located in an installed farm in Turkey were investigated in detail. For this aim, the energy analysis was performed in the examinations of the turbine characteristic curves belonging to the various aerodynamic parameters of operating wind turbines in this existing wind farm. In the calculation of wind turbine aerodynamic characteristics, data belonging to the hub-height wind speed ( $U_D$ ), atmospheric air temperature ( $T_{atm}$ ), wind turbine mechanical output power ( $P$ ), and turbine rotor rotational speed ( $\Omega$ ) were used. In this regard, the aerodynamic parameters were exposed corresponding to the free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) values and these obtained real model curves were compared with respect to the manufacturer characteristic values which were determined by the manufacturer company.

## 2. MATERIALS AND METHODS

Simple momentum theory was applied in determining the aerodynamic characteristics of horizontal axis wind turbines. Figure 1 shows the energy interaction in the flow tube with the rotating rotor, or in other words, with the disk in the wind. As can be seen, the output power generated by the wind turbine depends on the interaction between the rotor and wind. In a continuous flow system, if the principle of conservation of mass is applied, Equations 1-2.

$$\dot{m}_{in} = \dot{m} = \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$$\rho A_{in} U_\infty = \rho A_{rotor} U_{rotor} = \rho A_w U_w \quad (2)$$

the equations above are obtained. Here,  $\rho$  is the air density,  $A$  is the cross-sectional area, and  $U$  is the speed of the wind. Also, symbols *in* and  $\infty$ , *rotor*, and *w* are used as subscripts to indicate the inlet area of the stream tube at far upstream and the free-stream wind speed, the cross-sectional area of the rotor disc and hub-height wind speed, and exit area of the stream tube at far wake and the wind speed at far wake or also referred as dead zone wind speed, respectively. If the momentum conservation theory is applied in the flow tube as follows, equations

demonstrated above are obtained. If the Bernoulli equation is applied between upstream and downstream cross-sections with the assumption that the rotating disc in near-surface upstream and near-surface downstream wind velocities are equal, in this case, the following equations are obtained [9] (Equations 3-7).

$$\Delta M = T \quad (3)$$

$$\Delta M = \rho A_{in} U_{\infty}^2 - \rho A_w U_w^2 \quad (4)$$

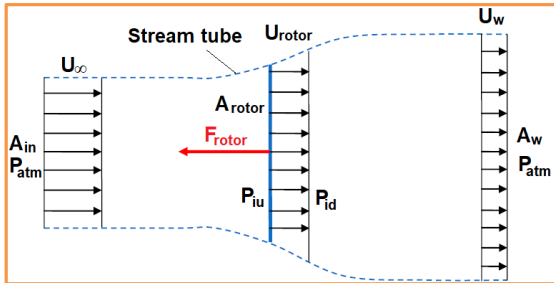
$$T = \rho A_{rotor} U_{rotor} (U_{\infty} - U_w) \quad (5)$$

$$P_{atm} + \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 = P_{iu} + \frac{1}{2} \rho U_{rotor}^2 \quad (6)$$

$$P_{atm} + \frac{1}{2} \rho U_w^2 = P_{id} + \frac{1}{2} \rho U_{rotor}^2 \quad (7)$$

When Equations (6) and (7) are combined, the pressure drop across the rotor blade plane inlet and outlet is obtained as follows:

$$(P_{iu} - P_{id}) = \frac{1}{2} \rho (U_{\infty}^2 - U_w^2) \quad (8)$$



**Figure 1.** Energy interaction of the rotating disc inside the air flow tube

This difference in pressure obtained in Equation (8) will result in a pushing force on the rotor blade plane.

$$T = (P_{iu} - P_{id}) A_{rotor} = \frac{1}{2} \rho A_{rotor} (U_{\infty}^2 - U_w^2) \quad (9)$$

Taking together with Equations (5) and (9) for thrust forces, the expression of hub-height wind speed,  $U_{rotor}$  depending on free-stream wind speed ( $U_{\infty}$ ) and the wind speed at the far wake ( $U_w$ ) is obtained as follows, (Equations 10-11)

$$U_{rotor} (U_{\infty} - U_w) = \frac{1}{2} (U_{\infty}^2 - U_w^2) \quad (10)$$

$$U_{rotor} = \frac{1}{2} (U_{\infty} + U_w) \quad (11)$$

The axial flow induction factor ( $a$ ) is expressed as follows, depending on the hub-height wind speed ( $U_D$ ) and the free-stream wind speed ( $U_{\infty}$ ), (Equation 12)

$$a = 1 - \frac{U_{rotor}}{U_{\infty}} \quad (12)$$

Knowing the free-stream wind speed ( $U_{\infty}$ );  $U_{rotor}$ , and  $U_w$  velocities are obtained in terms of axial flow induction factor ( $a$ ) by the following equations [9] (Equations 13-14):

$$U_{rotor} = U_D = U_{\infty} (1 - a) \quad (13)$$

$$U_w = U_{\infty} (1 - 2a) \quad (14)$$

Besides, rotor shaft power ( $P$ ) obtained by the turbine due to the thrust force ( $T$ ) and the airflow can be calculated by the following equations (Equations 15-16):

$$T = 2 \rho A_{rotor} U_{\infty}^2 a (1 - a) \quad (15)$$

$$P = 2 \rho A_{rotor} U_{\infty}^3 a (1 - a)^2 \quad (16)$$

The power coefficient ( $C_p$ ), which expresses the efficiency of the wind turbine, is given by Equations (7) and (8), respectively, depending on the free-stream wind speed ( $U_{\infty}$ ) or only on the axial flow induction factor ( $a$ ), (Equations 17-18)

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 A_{rotor}} \quad (17)$$

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (18)$$

The maximum value of the power coefficient is determined by calculating the value of the axial flow induction factor,  $a = 1/3$  using Equation (19) which is substituted at Equation (18) subsequently to expose the value of the Betz limit demonstrated in Equation (20) as follows,

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0 \quad (19)$$

$$C_{pmax} = 16/27 = 0.593 \quad (20)$$

This value is known as the Betz limit and represents the maximum efficiency that can be obtained from a wind turbine. On the other hand, the thrust coefficient ( $C_T$ ) to be applied to the disc (rotor blade) can be expressed by the following equations [9] (Equations 21-22),

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_{rotor}} \quad (21)$$

$$C_T = 4a(1-a) \quad (22)$$

The differential torque origination on the rotor disc will be equal to the rate of change of the angular momentum of the air passing through the disc cross-section (Equation 23),

$$\delta Q = \rho \delta A_{rotor} U_\infty (1-a) 2\Omega a' r^2 \quad (23)$$

Here,  $a'$  is the angular flow induction factor,  $\Omega$  is the turbine rotor rotational speed, and  $r$  is the radial radius of the rotor disc. The differential rotor shaft power ( $\delta P$ ), which forms on the rotor disc, can be expressed by Equation (24) depending on the differential of the term including torque origination on the rotor disc,  $Q$  and turbine rotor rotational speed,  $\Omega$  [9],

$$\delta P = \delta Q \Omega \quad (24)$$

$$P = \rho \delta A_d U_\infty (1-a) 2\Omega^2 a' r^2 \quad (25)$$

By taking Equations (16)-(25) together, Equation (26) is structured as follows,

$$U_\infty^2 a(1-a) = \Omega^2 a' r^2 \quad (26)$$

At the end of the rotor disc, i.e., at the radius  $r=R$ , the following equation can calculate the blade tip speed ratio ( $\lambda$ ) (Equations 27),

$$\lambda = \frac{R\Omega}{U_\infty} \quad (27)$$

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this study, data of horizontal axis wind turbines located in wind farms in the Hatay province of Turkey, was used [24]. The technical characteristics of equivalent wind turbines are shown in Table 1. The technical details of VESTAS V80-2.0MW type wind turbines include rotor diameter ( $D_{rotor}$ ) 80 m, the rotor swept area ( $A_d$ ) 5,027 m<sup>2</sup>, tower height 67 m, number of blades ( $n$ ) 3, nominal turbine rotor rotational speed ( $\Omega$ ) 16.7 rpm and turbine rated power ( $P_r$ ) of 2,000 kW. The measured data for five different turbines ( $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ ,  $T4$ , and  $T5$ ) were taken for the considered year. The parameters measured from each discrete turbine are the data of the rotor blade plane including hub-height wind speed ( $U_D$ ), atmospheric air temperature ( $T_{am}$ ), turbine mechanical output power ( $P$ ), and turbine rotor rotational speed ( $\Omega$ ) on the rotor blade plane.

**Table 1.** The technical specifications of five identical wind turbines located in WPP

Features of the wind turbines	Feature
Rotor diameter ( $D_{rotor}$ )	80 m
Rotor swept area ( $A_d$ )	5.027 m <sup>2</sup>
Nominal turbine rotor rotational speed	16.70 rpm
Rotor operating range	9-19 rpm
Number of blades ( $n$ ) on the route	3
Hub height (tower height)	67 m
The wind speed at which the turbine blades begin to turn (cut-in wind speed)	4 m/s
The nominal wind speed of the turbine	15 m/s
Turbine shutdown or cut-out wind speed	25 m/s
Turbine rated power ( $P_r$ )	2.000 kW
The working frequency and voltage of the alternator	50 Hz, 690 V

Firstly, the daily mean values of the data for the four aerodynamic parameters measured at intervals of 10 minutes were calculated, and the annual variations of parameters related to these obtained averages were exposed. Accordingly, based on the daily

average values of the turbine mechanical output powers ( $P$ ) obtained from wind turbines having a maximum power capacity of 2,000 kW ( $P_r$ ), it is observed that power values reaching this value are obtained in a minimal number of daily mean values. While the daily average turbine mechanical output power values obtained from the examined wind turbines, during the year, demonstrate a variation within a value range  $P=0.00$  kW and  $P=1,991.75$  kW, the annual mean wind turbine mechanical output power ( $P$ ) value obtained from all wind turbines was calculated as  $P=672.68$  kW. On the other hand, while the daily mean hub-height wind speeds ( $U_D$ ) on the rotor blade plane demonstrated a variation in the value range between  $U_D=0.56$  m/s and  $U_D=17.68$  m/s during the year, the annual average hub-height wind speed ( $U_D$ ) was calculated to be  $U_D=7.73$  m/s. Besides, the annual variation of the daily average atmospheric air temperature ( $T_{atm}$ ) values obtained from five turbines was also analyzed. In this regards, the daily mean atmospheric air temperature ( $T_{atm}$ ), throughout the year, demonstrated a variation in the value range between  $T_{atm}=5.10$  °C and  $T_{atm}=31.27$  °C, the annual average atmospheric air temperature ( $T_{atm}$ ) was calculated to correspond  $T_{atm}=19.36$  °C. Although the variations in the atmospheric air temperature ( $T_{atm}$ ) do not immensely influence the turbine performance and the wind turbine mechanical output power ( $P$ ), atmospheric air temperature ( $T_{atm}$ ) is one of the crucial parameters among turbine characteristics because the atmospheric air temperature ( $T_{atm}$ ) causes the change of the density of the air passing through the turbine rotor blades as well as the mass flux.

The annual variations of the daily average wind turbine rotor rotational speed ( $\Omega$ ) values obtained from five different wind turbines were examined. While the daily mean wind turbine rotor rotational speed values present a variation within the range of  $0.00$  rpm  $\leq \Omega \leq 16.70$  rpm during the year, the annual average wind turbine rotor rotational speed was calculated to be  $\Omega=12.81$  rpm. Additionally, it has also been identified that the investigated wind turbines operate at a nominal rotor rotational speed, of  $\Omega=16.70$  rpm, corresponding to a proportion of approximately 45% of the year-round.

The variation of the daily mean axial flow induction factors ( $a$ ) calculated for five wind turbines over the considered year was also investigated. When this situation is taken into account, it is seen that the daily average axial flow induction factor ( $a$ ) values including all turbines demonstrate a variation within the range of  $0.00 \leq a \leq 0.27$  during the considered year, and the annual mean value of the axial flow induction factor ( $a$ ) of the wind turbines was calculated as  $a=0.10$ . On the other hand, the annual variation of the daily average turbine power coefficients ( $C_p$ ) was calculated for five wind turbines in the concept of the energy analysis. While the values belonging to the daily average turbine power coefficient ( $C_p$ ), demonstrates a variation within the range of  $0.00 \leq C_p \leq 0.58$  throughout the considered year, the annual mean value of the turbine power coefficients ( $C_p$ ) was reported as  $C_p=0.30$ .

The annual variations of the daily mean thrust coefficient ( $C_T$ ), thrust force ( $T$ ), and blade tip speed ratio ( $\lambda$ ) values belonging to five wind turbines were studied based on the aerodynamic analyses. Based on the obtained results; the daily mean thrust coefficient ( $C_T$ ) values, throughout the year, demonstrated a variation with the range of  $0.00 \leq C_T \leq 0.69$ , the daily mean thrust force ( $T$ ) values have a variation within the range of  $0.00$  kN  $\leq T \leq 145.52$  kN, and the daily mean blade tip speed ratio ( $\lambda$ ) values presented a variation within the range of  $0.00 \leq \lambda \leq 9.89$ . On the other hand, the annual mean values belonging to five wind turbines indicating at which daily value the related aerodynamic characteristics throughout the year correspond to, were calculated as  $C_T=0.34$ ,  $T=75.18$  kN, and  $\lambda=6.57$ , respectively. As a result, the value ranges expressed according to the minimum and maximum values of the daily averages created over the considered year using all turbine aerodynamic characteristics obtained from five turbines and the annual mean values of these aerodynamic parameters are given in Table 2. To sum up, the daily averages created along the year through the utilization of all wind turbine aerodynamic characteristics obtained over five wind turbines coincide to which minimum and maximum values of the aerodynamic parameter value ranges and

annual mean values of these aerodynamic parameters are given in this table.

The variations of the aerodynamic characteristics obtained from wind turbines of WPP with respect to the free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) have also been studied. Initially, variations of the values belonging to the daily average wind turbine mechanical output power ( $P$ ) obtained from five wind turbines presented dependent on the free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) are demonstrated in Figure 2. As the free-stream wind speed reaches approximately  $U_\infty=3$  m/s, it has been identified that wind turbines prominently started power generation and as well has been identified that this power generation withal increased in direct proportion with free-stream wind speed ( $U_\infty$ ). It has been observed that wind turbines started maximum power generation in case if free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) attained a nominal speed value of approximately  $U_\infty=15$  m/s and as well has been observed that power generation remained approximately at a constant value exceeding this speed value. On the other hand, the measured values of the turbine mechanical output power ( $P$ ) obtained for the five wind turbines appear to be quite compatible with each other, but these measured values are reported to be smaller than the manufacturer characteristic values determined by the wind turbine manufacturing company. The manufacturer characteristic values are shown to be located along the manufacturer characteristic curve (MCC). Besides, the alterations of the daily average power coefficient ( $C_p$ ) values obtained from five wind turbines presented with respect to the free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) are exhibited in Figure 3. It is possible to divide the  $C_p-U_\infty$  performance curve into three regions within the specific free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) value ranges:

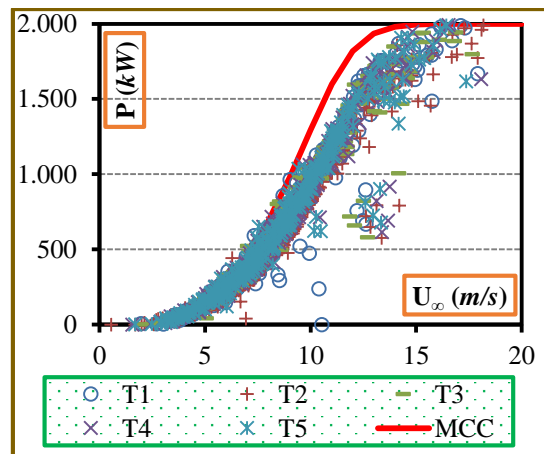
- Region 1:  $3 \text{ m/s} \leq U_\infty \leq 5 \text{ m/s}$ , region of low wind speeds,
- Region 2:  $5 \text{ m/s} \leq U_\infty \leq 10 \text{ m/s}$ , region of moderate wind speeds,
- Region 3:  $10 \text{ m/s} \leq U_\infty \leq 25 \text{ m/s}$ , region of high wind speeds.

The power coefficient ( $C_p$ ) values of wind turbines lessen in Region 1 having lower free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) values and in Region 3 having higher

free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) values. For a given free-stream wind speed,  $U_\infty$  value, rotor efficiency is a function of the rotor rotation rate. Efficiency decreases in the cases when the rotor rotates so slowly.

**Table 2.** Minimum, maximum, and annual average values of the turbine characteristics depending on their daily averages along the year

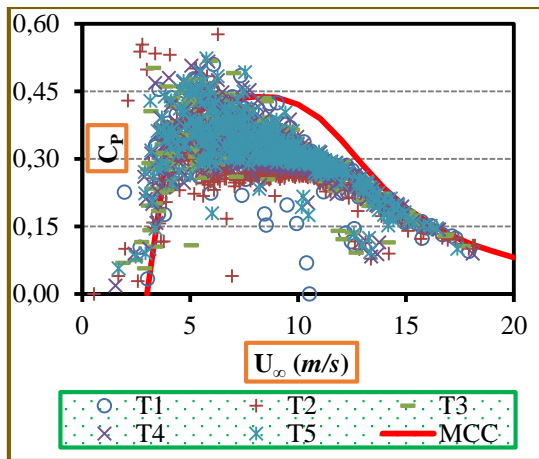
Characteristic	Unit	Min.	Max.	Av.
$T_{atm}$	°C	5.10	31.27	19.36
$U_\infty$	m/s	0.56	18.19	8.49
$U_D$	m/s	0.56	17.68	7.73
$U_w$	m/s	0.01	17.24	6.97
$\Omega$	rpm	0.00	16.70	12.81
$P$	kW	0.00	1,991.75	672.68
$a$	-	0.00	0.27	0.10
$C_p$	-	0.00	0.58	0.30
$C_T$	-	0.00	0.69	0.34
$T$	kN	0.00	145.52	75.18
$\lambda$	-	0.00	9.89	6.57



**Figure 2.** Variation of daily average wind turbine mechanical output power ( $P$ ) values depending on the free-stream wind speed ( $U_\infty$ )

For a considered wind speed value, the rotor efficiency is a function of wind turbine rotor rotational speed ( $\Omega$ ). In the case of the rotor to rotate so slowly, a significant decline in the efficiency originates, because in this case, the blades allow too much air to pass through the rotor disc without

contacting with blades. For example, if a theoretical situation having the rotor rotating at very low rotational speeds, however as well having the wind approaching the rotor disc possessing quite high speeds is taken into account: If such case eventuates, depending to the circumstance of the blades to rotate at very low speeds, a certain amount of the air mass approaching the rotor can pass across the disc without interacting with the rotor and thus cannot transmit its energy to the blades. In the opposite, i.e., in case of the rotor to rotate so quickly, again, a drop in the efficiency occurs, because, in this case withal, inside the rotor-blade plane, the turbulence generated by one blade incrementally negatively influences the following blade. Namely, in a theoretical situation of the rotor rotating at very high rotational speeds, however in the same situation having wind approaching the rotor to be so tardy, deviations may occur in the flow pattern constituted as the wind beam passes over the wind turbine. On account of depending to the high rate of turbulence and also the vorticity generations, losses in the energy may eventuate. In either of these cases considered, the interaction actualized between the rotor and the wind flow cannot be in a sufficient quantity, and for this reason, enough efficiency cannot be provided. Consequently, in both of these cases withal, generations of lower values of power coefficients ( $C_p$ ) are occurred.



**Figure 3.** Change of daily mean turbine power coefficient ( $C_p$ ) values based on free-stream wind speed ( $U_\infty$ )

On the other hand, at the Region 2, having moderate free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) values, turbine power coefficients ( $C_p$ ) reached maximum values by exceeding  $C_p=30\%$ . However, under the nominal free-stream wind speed value of  $U_\infty=15$  m/s in which wind turbines actualize maximum turbine mechanical output power ( $P$ ), i.e., at the Region 3 involving high free-stream wind speed values, the turbine power coefficient ( $C_p$ ) values were calculated as approximately  $C_p=18\%$ . Furthermore, the turbine power coefficient ( $C_p$ ) values calculated for five wind turbines were shown to be generally slightly lower than the manufacturer characteristic values determined by the turbine manufacturer.

Figures 4 and 5 respectively show the variations of daily average axial flow induction factor ( $a$ ) and thrust coefficient ( $C_T$ ) values presented with respect to the free-stream wind speed ( $U_\infty$ ). As in the case of the  $C_p-U_\infty$  performance curve, it is possible to distinguish also 3 regions considering  $a-U_\infty$  and  $C_T-U_\infty$  performance curves. At the value range including the turbine power coefficient ( $C_p$ ) to be the highest and free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) values to have  $U_\infty=5$  m/s and  $U_\infty=10$  m/s extreme values and defined as the 2<sup>nd</sup> region, the mean axial flow induction factor ( $a$ ) and the average thrust coefficient ( $C_T$ ) values were found approximately to be  $a=0.1$  and  $C_T=0.4$ , respectively. However, considering the 3<sup>rd</sup> region under the nominal free-stream wind speed of  $U_\infty=15$  m/s where the turbine power is maximum, these cited values are calculated approximately as  $a=0.05$  and  $C_T=0.19$ , respectively.

The variations of the daily average values of the total thrust force ( $T$ ) applied by the wind to the rotor depending on the free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) for five wind turbines taken into account are shown in Figure 6. The actual thrust force ( $T$ ) values calculated for the wind turbines are generally lower than the values constituted by the manufacturer characteristic thrust force curve expressed in terms of the free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) function. Furthermore, according to Eq. (15) belonging to thrust force ( $T$ ), and because of this force to be dependent to both " $U_\infty^2$ " as well as " $a(1-a)$ " terms: A breaking point occurs at a definite free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) value in the function curve of

thrust force ( $T$ ) defined with respect to the free stream wind speed ( $U_\infty$ ). For example, according to the manufacturer characteristic thrust force ( $T$ ) values, at the  $U_\infty=12.01$  m/s value of the free-stream wind speed ( $U_\infty$ ), the thrust force reaches its maximum value of  $T=169.36$  kN. On the other hand, for the considered  $T1, T2, T3, T4$ , and  $T5$  wind turbines, the values belonging to the measured actual thrust force reach the maximum values of  $T=144.85$  kN,  $T=141.50$  kN,  $T=146.52$  kN,  $T=145.96$  kN, and  $T=144.85$  kN at a corresponding free-stream wind speed of  $U_\infty=12.31$  m/s,  $U_\infty=12.52$  m/s,  $U_\infty=12.10$  m/s,  $U_\infty=12.96$  m/s, and  $U_\infty=13.23$  m/s, respectively.

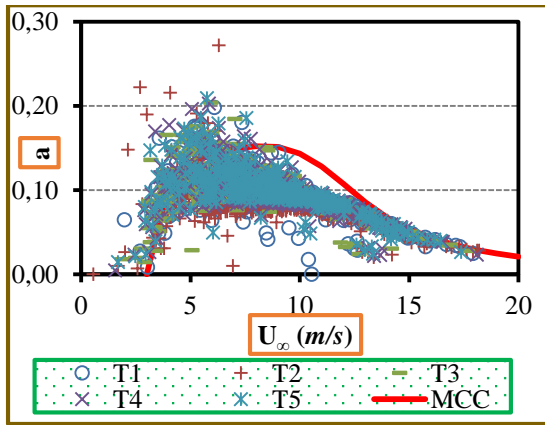


Figure 4. Alteration of daily mean axial flow induction factor ( $a$ ) values with respect to the free-stream wind speed ( $U_\infty$ )

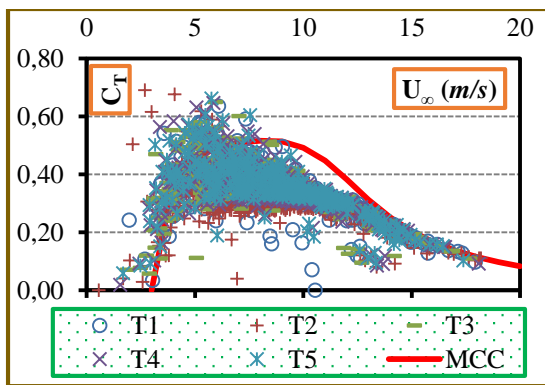


Figure 5. Variation in daily mean thrust coefficient ( $C_T$ ) values with free-stream wind speed ( $U_\infty$ )

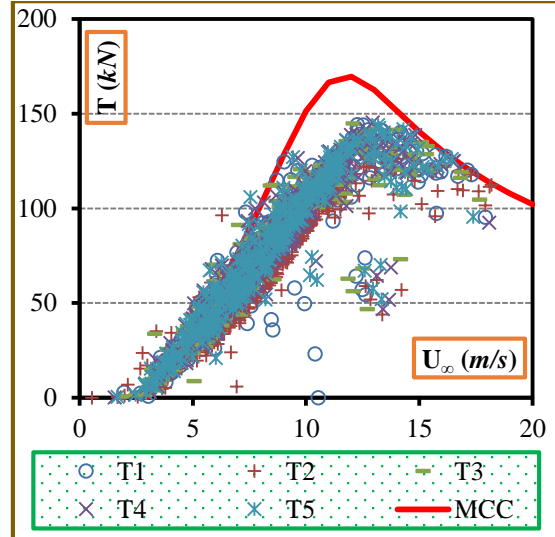
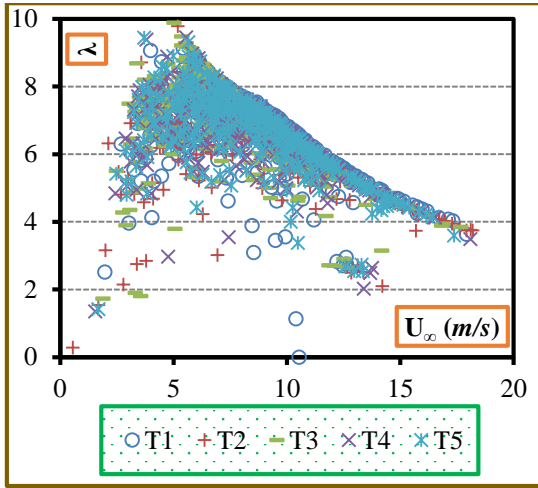


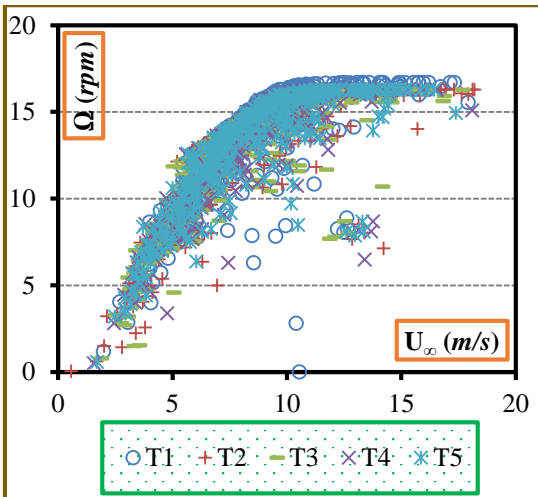
Figure 6. Change in daily mean thrust force ( $T$ ) values in terms of free-stream wind speed ( $U_\infty$ )

The expressions of the variations belonging to the daily average blade tip speed ratios ( $\lambda$ ) calculated for five wind turbines presented in terms of free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) are shown in Figure 7. It is reported that in order to operate wind turbines at the highest efficiency, their blade tip speed ratios are supposed to be at the average of  $\lambda=7.1$  value. On the other hand, the blade tip speed ratio corresponds to an average value of  $\lambda=4.5$ , under the nominal free-stream wind speed value of  $U_\infty=15$  m/s in which the wind turbines attain their maximum power generations. Besides, the expressions of the daily average turbine rotor rotational speed ( $\Omega$ ) values obtained from five wind turbines presented in terms of free-stream wind speed ( $U_\infty$ ) are demonstrated in Figure 8. It is seen that values belonging to the turbine rotor rotational speed,  $\Omega$  generally increase with the increase of free-stream wind speed,  $U_\infty$ . However, in a case when the free-stream wind speed is  $U_\infty=10$  m/s, it is observed that values belonging to the turbine rotor rotational speed ( $\Omega$ ) will have the characteristics to be unaltered. Because, when this cited value is exceeded, turbine rotor rotational speed,  $\Omega$  generally remains at a constant rotational speed value of approximately  $\Omega=16.30$  rpm.





**Figure 7.** Alteration of daily mean blade tip speed ratio ( $\lambda$ ) values depending on the free-stream wind speed ( $U_\infty$ )



**Figure 8.** Variation of daily average wind turbine rotor rotational speed ( $\Omega$ ) values based on the free-stream wind speed ( $U_\infty$ )

#### 4. CONCLUSIONS

In this study, the annual aerodynamic characteristics based on their daily averages and these daily average aerodynamic characteristics determined according to the approaching wind speed of five identical horizontal axis wind turbines of 2 MW rated power operating in an installed wind

farm in Hatay/Turkey region have been investigated utilizing aerodynamic and energy analyses tools:

- In the analysis of the *WPP*, it is conducted that horizontal axis wind turbines with turbine rated power of  $P_r=2$  MW generated annual mean turbine mechanical output power of  $P=672.68$  kW, under an annual mean power coefficient of  $C_p=30.80\%$ , under the annual mean free-stream wind speed of  $U_\infty=8.49$  m/s, at the annual average wind turbine rotor rotational speed of  $\Omega=12.81$  rpm, at the annual average axial flow induction factor of  $a=0.10$  and the thrust coefficient of  $C_T=0.34$ , possesses the annual mean thrust force value of  $T=75.18$  kN, and finally operates at annual average blade tip speed ratio of  $\lambda=6.57$ . Thus, the efficiency of the five wind turbines in this *WPP* was also concluded to be high.

- While wind turbine power coefficient reaches the maximum value by exceeding  $C_p=30\%$  in the case when the free-stream wind speed values vary in the range between  $U_\infty=5$  m/s and  $U_\infty=10$  m/s, the average power coefficient value belonging to all wind turbines in this *WPP* was calculated to be about  $C_p=18\%$  under the nominal free-stream wind speed value of  $U_\infty=15$  m/s at which the wind turbines generate maximum power. Based on these conducted outcomes, at the moderate values of free-stream wind speed, higher turbine efficiencies were reported to be obtained.

- The efficiency of a wind turbine is expressed by the value of the power coefficient. Generally the power coefficient is the function of the approaching free-stream wind speed to the rotor disc. However, considering the field operating conditions, the power coefficient value of the turbine is influenced also by the operating conditions. To explain more clearly, while the theoretical possible wind power that is to be obtained by a wind turbine is limited by the Betz limit as provided in Eq. (20); this value of efficiency of 59.3% is also not possible to be reached by real operating conditions. Namely, when the ideal operating conditions are considered, as demonstrated by the

manufacturer curve located in the  $C_p-U_\infty$  figure, maximum ideal power in the range of free-stream wind speed of  $5 \text{ m/s} < U_\infty < 10 \text{ m/s}$  may only reach 45%. But the real operating conditions, due to the many factors such as the location of the wind turbine, the turbulence influences of the wind, the wind direction, and the unsteady characteristics of the wind stream will certainly cause extra loss of the efficiency. Namely, the operating power coefficient values of the wind turbines will further decrease down to a level of 30% or slightly more in the operating range of  $5 \text{ m/s} < U_\infty < 10 \text{ m/s}$  of free-stream wind speed. Highest axial flow induction factor ( $a$ ) obtained in this range of free-stream wind speed as demonstrated in  $a-U_\infty$  performance curve, indicates the highest capture of the wind energy, by the blades, that will be converted to mechanical energy. This situation is obtained in the above expressed range of free-stream wind speed that causes highest wind turbine efficiencies.

- The mean axial flow induction factor ( $a$ ) and the average thrust coefficient ( $C_T$ ) values belonging to all wind turbines of this *WPP* were found to correspond approximately to values of  $a=0.10$  and  $C_T=0.40$ , respectively, presented within a free-stream wind speed range varying from  $U_\infty=5 \text{ m/s}$  to  $U_\infty=10 \text{ m/s}$  where the turbine power coefficient ( $C_p$ ) coincide to the highest values. However, at the nominal free-stream wind speed value of  $15 \text{ m/s}$  where the wind turbine mechanical output power ( $P$ ) is maximum, these values were determined approximately at the values of  $a=0.05$  and  $C_T=0.19$ , respectively. The parameters of axial flow induction factor,  $a$  and thrust coefficient,  $C_T$  are the measure of the energy convertibility and propulsion effectiveness of the blades. So, it is reported that highest values of  $a$  and  $C_T$  were obtained in parallel at the highest values of  $C_p$  in Region 2 of wind blowing magnitude.
- The value of maximum thrust force obtained from five wind turbines in *WPP* reaches approximately  $T=144 \text{ kN}$  when the value belonging to the free-stream wind speed is approximately,  $U_\infty = 12.5 \text{ m/s}$ . As in the case

of power extraction from the blades, the enhancement of the free-stream wind speed results the increase of thrust force,  $T$  up to a certain value of free-stream wind speed. Besides, at the higher values of thrust force, the blades cannot capture the flowing wind due to high wind speed, which result the decrease of blade propulsion. Consequently, the extracted power values will remain at constant values over a certain value of free-stream wind speed.

- In order for the wind turbines of *WPP* to operate at maximum efficiency, it is conducted that the blade tip speed ratio must be at an average value of  $\lambda=7.10$  considering all wind turbines. On the other hand, under the nominal free-stream wind speed value of  $U_\infty=15 \text{ m/s}$  at which the wind turbines of the farm reach maximum power generation, the blade tip speed ratio corresponds to an average value of  $\lambda=4.50$ .
- Wind turbine rotor rotational speed ( $\Omega$ ) increases with increasing free-stream wind speed ( $U_\infty$ ), but when the free-stream wind speed is  $U_\infty=10 \text{ m/s}$ , the turbine rotor rotational speed remains at a constant threshold value of approximately  $\Omega=16.30 \text{ rpm}$ , i.e., the access to the nominal rotor rotational speed ( $\Omega$ ) value is provided in *WPP*. The threshold value of the turbines is also explained based on the above physics of wind power extraction phenomenon.
- Although five identical wind turbines were studied in the same wind farm, there is a significant difference in terms of the values of the aerodynamic parameters between them. This is due to the wind farm being situated in the valley containing many hills, crests, and roughness. This topographic condition of the wind farm influences the wind directions and wind characteristics. Ultimately the unsteady wind characteristics result gust effects that negatively influence the performance in some of the wind turbines. Whole studied aerodynamic parameters are linked with each other, as expressed throughout the article. For instance, the power coefficient ( $C_p$ ) is mainly dependent to the axial flow induction factor ( $a$ ), since this aerodynamic parameter determines the amount

of wind energy that is captured by the turbine rotor blades, to be converted to mechanical energy. So, it is expected that the trend of the  $a-U_\infty$  and  $C_p-U_\infty$  curves will be the identical. The study has already shown this situation. Similarly, the analysis of Eq. (27) reveals that the aerodynamic parameters such as the blade tip speed ratio ( $\lambda$ ) and the rotor rotational speed ( $\Omega$ ) are also linked with each other. Namely, it is clear that the negative influence occurred on one of both parameters by the topographic conditions will also result the other parameter negatively. To give an example, at 2 m/s value of free-stream wind speed, while wind turbine T1 results a power coefficient value of  $C_p=22.60\%$ , wind turbine T2 results a power coefficient value of  $C_p=10.01\%$ . On the other hand, the value of manufacturer curve or its trend, for  $C_p$  parameter is identical for whole identical wind turbines, on constant value of free-stream wind speed. So, it is concluded that the discrepancies resulted between the real operating  $C_p$  values of five wind turbines have been caused by the topographic conditions as well as the wind directions and unsteady wind characteristics.

- Under the utilization of these aerodynamic and energy analyses tools; the values obtained from all wind turbines at the characteristic model curves in terms of aerodynamic context based on the measured values were obtained at values generally lower than the manufacturer characteristic values identified by the wind turbine manufacturer. Thus, it is concluded that many factors including working medium of the wind turbines, cut-in and cut-out functions, the topography, the wear out problems of the turbines, and malfunction periods of them strongly influence the wind turbines to operate at the highest efficiency.

## 5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank the Office of Scientific Research Projects of Cukurova University for funding this project under the Contract No: FBA-2019-11937.

## 6. REFERENCES

1. Kaplan, Y.A., 2015. Overview of Wind Energy in the World and Assessment of Current Wind Energy Policies in Turkey. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 43, 562-568.
2. Waewsak, J., Landry, M., Gagnon, Y., 2015. Offshore Wind Power Potential of the Gulf of Thailand. *Renew. Energ.*, 81, 609-626.
3. Emmanouil, G., Galanis, G., Kalogeri, C., Zodiatis, G., Kallos, G., 2016. 10-Year High Resolution Study of Wind, Sea Waves and Wave Energy Assessment in the Greek Offshore Areas. *Renew. Energ.*, 90, 399-419.
4. Korompili, A., Wu, Q., Zhao, H., 2016. Review of VSC HVDC Connection for Offshore Wind Power Integration. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 59, 1405-1414.
5. Söderholm, P., Pettersson, M., 2011. Offshore Wind Power Policy and Planning in Sweden. *Energy Policy*, 39(2), 518-525.
6. Kulkarni, P.A., Dhoble, A.S., Padole, P.M., 2018. Deep Neural Network-Based Wind Speed Forecasting and Fatigue Analysis of a Large Composite Wind Turbine Blade. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C*, 233(8), 2794-2812.
7. Zheng, C.W., Li, C.Y., Pan, J., Liu, M.Y., Xia, L.L., 2016. An Overview of Global Ocean Wind Energy Resource Evaluations. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 53, 1240-1251.
8. Hsu, M.H., 2008. Dynamic Behaviour of Wind Turbine Blades. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C*, 222(8), 1453-1464.
9. Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., Bossanyi, E., 2011. *Wind Energy Handbook*. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley and Sons, United Kingdom.
10. He, Y.C., Chan, P.W., Li, Q.S., 2013. Wind Characteristics Over Different Terrains. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 120, 51-69.
11. Kishinami, K., Taniguchi, H., Suzuki, J., Ibano, H., Kazunou, T., Turuhami, M., 2005. Theoretical and Experimental Study on the Aerodynamic Characteristics of a Horizontal Axis Wind Turbine. *Energy*, 30, 2089-2100.
12. Sedaghat, A., Assad, M.E.H., Gaith, M., 2014. Aerodynamics Performance of Continuously Variable Speed Horizontal Axis Wind Turbine with Optimal Blades. *Energy*, 77, 752-759.

13. Wekesa, D.W., Wang, C., Wei, Y., 2016. Empirical and Numerical Analysis of Small Wind Turbine Aerodynamic Performance at a Plateau Terrain in Kenya. *Renew. Energ.*, 90, 377-385.
14. Ashrafi, Z.N., Ghaderi, M., Sedaghat, A., 2015. Parametric Study on Off-design Aerodynamic Performance of a Horizontal Axis Wind Turbine Blade and Proposed Pitch Control. *Energy Convers. Manage.*, 93, 349-356.
15. Lee, M.H., Shiah, Y.C., Bai, C.J., 2016. Experiments and Numerical Simulations of the Rotor-Blade Performance for a Small-Scale Horizontal Axis Wind Turbine. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 149, 17-29.
16. Melo, D.B., Baltazar, J., de Campos, J.A.C.F., 2018. A Numerical Wake Alignment Method for Horizontal Axis Wind Turbines with the Lifting Line Theory. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 174, 382-390.
17. Kaya, M.N., Kose, F., Ingham, D., Ma, L., Pourkashanian, M., 2018. Aerodynamic Performance of a Horizontal Axis Wind Turbine with Forward and Backward Swept Blades. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 176, 166-173.
18. Pourrajabian, A., Ebrahimi, R., Mirzaei, M., 2014. Applying Micro Scales of Horizontal Axis Wind Turbines for Operation in Low Wind Speed Regions. *Energy Convers. Manage.*, 87, 119-127.
19. Li, Q., Murata, J., Endo, M., Maeda, T., Kamada, Y., 2016. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Turbulent Inflow on a Horizontal Axis Wind Turbine (Part I: Power Performance). *Energy*, 113, 713-722.
20. Xie, W., Zeng, P., Lei, L., 2017. Wind Tunnel Testing and Improved Blade Element Momentum Method for Umbrella-type Rotor of Horizontal Axis Wind Turbine. *Energy*, 119, 334-350.
21. Singh, R.K., Ahmed, M.R., Zullah, M.A., Lee, Y.H., 2012. Design of a Low Reynolds Number Airfoil for Small Horizontal Axis Wind Turbines. *Renew. Energ.*, 42, 66-76.
22. Karthikeyan, N., Murugavel, K.K., Kumar, S.A., Rajakumar, S., 2015. Review of Aerodynamic Developments on Small Horizontal Axis Wind Turbine Blade. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 42, 801-822.
23. Bilgili, M., Tontu, M., Sahin, B., 2021. Aerodynamic Rotor Performance of a 3300-kW Modern Commercial Large-scale Wind Turbine Installed in a Wind Farm. *J. Energy Resour. Technol.*, 143, 031302.
24. Ilhan, A., Bilgili, M., Sahin, B., 2018. Analysis of Aerodynamic Characteristics of 2 MW Horizontal Axis Large Wind Turbine. *Wind Struct.*, 27(3), 187-197.
25. Bilgili, M., Yasar, A., 2017. Performance Evaluation of a Horizontal Axis Wind Turbine in Operation. *Int. J. Green Energy*, 14(12), 1048-1056.
26. Cooney, C., Byrne, R., Lyons, W., O'Rourke, F., 2017. Performance Characterization of a Commercial-scale Wind Turbine Operating in an Urban Environment. Using Real Data, *Energy Sustain Dev*, 36, 44-54.
27. Sedaghat, A., Mirhosseini, M., 2012. Aerodynamic Design of a 300 kW Horizontal Axis Wind Turbine for Province of Semnan. *Energy Convers. Manage.*, 63, 87-94.
28. Taner, T., 2018. Economic Analysis of a Wind Power Plant. A Case Study for the Cappadocia Region, *J. Mech. Sci.*, 32(3), 1379-1389.



## Performance Assessment of ZrO<sub>2</sub> Nanofibrous Oxygen Sensor

Özlem ERDEM YILMAZ\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-0976-2162

<sup>1</sup>Cukurova University, Adana Vocational School of Higher Education, Depart of Textile Technologies, Adana

Geliş tarihi: 06.06.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: YILMAZ, Ö.E., (2021). ZrO<sub>2</sub> Nanolif Oksijen Sensörünün Performans Değerlendirmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 979-987.

### Abstract

An alternative oxygen sensor to conventional ZrO<sub>2</sub> based automotive oxygen sensors (COS) was successfully manufactured. ZrO<sub>2</sub> nanoparticles were used as base material and nanofibers were fabricated via electrospinning using polyvinyl alcohol and ZrO<sub>2</sub> solution (ZrO<sub>2</sub>+PVOH) to obtain active surface of the sensor where the engine exhaust gas interacts and chemisorption reactions take place prior to calcination process of nanofibers at 700 °C. Thanks to operating temperature control and high surface/volume ratio of nanofibrous structure, the ZrO<sub>2</sub>+PVOH nanofibrous sensor demonstrated similar performance with COS under increasing exhaust gas percentage (until 50-60%) along with increasing operating temperature conditions. For ZrO<sub>2</sub>+PVOH nanofibrous sensor, maximum sensing performance (R<sub>a</sub>/R<sub>e</sub>) of 7.24 was achieved at sensor operating temperature of 700 °C and exhaust gas concentration of 50% whereas it was 8.11 for EOS under same conditions. The ZrO<sub>2</sub>+PVOH nanofibrous sensor performed acceptable performance throughout wider operating temperature range (270-900 °C) compared to conventional COS. Though an average of 15% reduction in sensing performance was observed for ZrO<sub>2</sub>+PVOH nanofibrous sensor, the promising results of this alternative oxygen sensor will be a good guide for more comprehensive future works focusing on oxygen sensors with very rapid response-recovery time and light-off capability.

**Keywords:** Oxygen sensor, Nanofiber, Electrospinning, ZrO<sub>2</sub> nanoparticles, Exhaust gas

### ZrO<sub>2</sub> Nanolif Oksijen Sensörünün Performans Değerlendirmesi

#### Öz

ZrO<sub>2</sub> tabanlı geleneksel otomotiv oksijen sensörlerine (GOS) alternatif bir oksijen sensörü başarıyla üretilmiştir. Egzoz gazlarının temas edeceği ve kimyasal reaksiyonların başlayacağı sensör aktif yüzeyini oluşturmak için, polivinil alkol ve ZrO<sub>2</sub>'den oluşan çözelti kullanılarak (ZrO<sub>2</sub>+PVOH) elektroçirime yöntemiyle nanolifler elde edilmiş ve sonrasında bu lifler 700 °C sıcaklıkta kalsinasyon işlemine tabi tutulmuştur. İşlem sıcaklığının hassas kontrolü ve nanolif yapıların yüksek yüzey/hacim oranları sayesinde, artan egzoz gaz konsantrasyonları (%50-60'a kadar) ve yüksek çalışma sıcaklığı şartları altında, ZrO<sub>2</sub>+PVOH nanolif sensörün GOS'a yakın ölçüm performansı gösterdiği tespit edilmiştir.

---

\*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Özlem ERDEM YILMAZ, ozlemerdem@cu.edu.tr

ZrO<sub>2</sub>+PVOH nanolif sensörün 700 °C çalışma sıcaklığı ve %50 egzoz gaz konsantrasyonunda maksimum algılama performansı ( $R_a/R_e$ ) olan 7,24'ü gösterdiği, aynı şartlar altında geleneksel oksijen sensörü için ise bu değer 8,11 olduğu tespit edilmiştir. Nanolif sensörün geniş bir egzoz gaz sıcaklık aralığında (270-900 °C), kabul edilebilir algılama sonuçları gösterdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen performans değeri, GOS'a kıyasla ortalama %15 az olsa da, bu nanolif sensör, gelecekte üretilecek daha kısa cevap-toparlanma süresine sahip ve hassas ölçüm yapabilen oksijen sensörleri için umut vadetmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Oksijen sensörü, Nanolif, Elektroçirime, ZrO<sub>2</sub> nanopartikül, Egzoz gazı

## 1. INTRODUCTION

For many years, sensors have been irrevocable thanks to their wide usage area such as sensing physical measures, detecting hazardous and explosive gases for health and environmental concerns as studied by many researchers: Mun et.al. manufactured resistive-type lanthanum ferrite oxygen sensor based on nanoparticle-assimilated nanofiber architecture composing functional powders by sol-gel and electrospinning methods. The results demonstrate that powder formed using mixing of two methods performed the highest response time compared to that of sol-gel method. [1]. Li et.al. carried out a review study focusing on gas sensors based on semiconducting metaloxide nanostructures (SMONs) with various mechanisms including nanoparticles, nanowires, nanosheets, nanorods, etc. The research depicts that in some applications surface modification may be needed for nanoparticle based gas sensors for high sensitivity and metal ion doped SMONs are capable of adsorbing high amount of oxygen molecules due to increased number of active sites and more defects on the surfaces [2]. An experimental study on NH<sub>3</sub> gas sensors has been conducted by Hu et.al. [3] that is related to chemically reduced graphene oxide (rGO) based gas sensors. The promising results offer that the sensor response time is 1.4 times faster than that of the conventional NH<sub>3</sub> sensors. Another study on detection of volatile organic compounds (VOCs) demonstrates that Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene gas sensors performs quite effectiveness sensing 50–100 ppb for VOC gases at room temperature surpassing the best sensors known [4]. More related topics including detection of hazardous gases, physical measures and precautions taken against environmental and health issues can be found

elsewhere [5-10]. Among these, metal oxide semiconductor sensors are renowned for their high precision in gas detection under high temperature conditions [11-14]. Oxygen sensors are to be utilized in variety of fields such as fire prevention systems [15], blood gas monitoring [16] and oxygen concentrators [17]. Likewise, automotive industry has been utilizing sensors as “sense organs” in transportation vehicles i.e. detection of pressure and temperature of intake air, motion detection (crank, detonation, ABS, etc.), impact (airbag sensors), fuel flowrate, altitude, park assistance, steering angle, etc. [18-22].

Sensing mechanism of an oxygen sensor depends on the voltage (Nernst voltage) generated by a ZrO<sub>2</sub> electrochemical cell. At high temperatures above 600 °C, oxygen ions form due to dissociation of ZrO<sub>2</sub> making it a solid electrolyte for oxygen. As DC current flows through a ZrO<sub>2</sub> disc coated with porous electrodes, oxygen ions from the atmosphere commence to be transported on the disc and an amount of oxygen at the anode is liberated proportional to the electrical charge (Figure 1) [23-26].

Although these solid-state electrochemical oxygen sensors have been well-known and have undergone development processes, they have considerable amount of drawbacks including low sensitivity to fluctuations of oxygen partial pressure and low diffusion rate of oxygen at the active layer of the sensor impairing high sensitivity [1,27,28]. A rational solution to this drawback is to present a chemical sensor comprised of metal oxide doped nanofibers fabricated via electrospinning process. The gas detection of these conductometric sensors are based on the very rapid electrical resistance



change of the surface exposed to the target gas thanks to their large SVR [1,29-31].

Electrospinning technique has always been in the radar of researchers due to its versatility, cost-effectiveness, high efficacy and simplicity in terms of nanofibrous natural and synthetic polymer fabrication. Briefly, electrospinning deals with electrostatic forces to form fiber in submicron range. Electric field, distance between feeding unit and collector, feeding rate are influential on morphology and diameter of the nanofibers in electrospinning process [32-36]. Furthermore, electrospinning is a good way of fabricating thin film layers and in chemical sensors, thin film production for sensor active surface provides considerable amount of increase in sensing efficiency since gas sensing performance is

associated with active surface electrical conductivity [37-39].

This study aims to provide oxygen sensing performance evaluation of a manufactured  $ZrO_2$  doped PVOH nanofibrous sensor under various exhaust gas fractions and sensor working temperatures in terms of sensing effectiveness considering designated engine working parameters and make a comparison to engine oxygen sensor (EOS). Nonetheless, electrospun nanofibers underwent heat-treatment process (calcination) to increase the sensing effectiveness. The morphology, chemical composition and characterization of the  $ZrO_2$  nanoparticles and fabricated nanofibers were also presented.

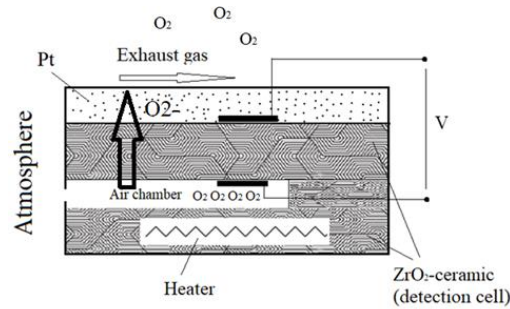


Figure 1. Schematic of a narrow-band conventional oxygen sensor [23]

## 2. MATERIALS & METHOD

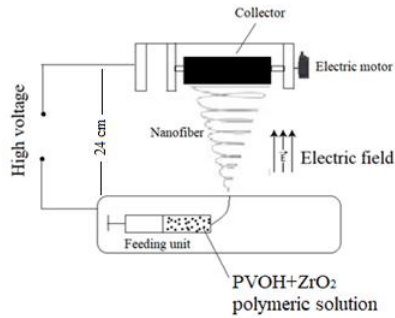
### 2.1. Electrospinning Process

To prepare a homogenous polymeric solution, polyvinyl alcohol (PVOH,  $M_w \approx 125000$ , 88% hydrolyzed) in weight ratio of 5% was mixed with distilled water to conduct dissolution process and the mixture was maintained at 120 °C for 30 min. In the subsequent stage, 0.5 g (2.5%) of  $ZrO_2$  nanoparticle powder (<100 nm, 99.5% purity, Sigma-Aldrich, Inc.) was incorporated in the PVOH solution and ultrasonicated for 5 h to impede probable precipitations and no agglomeration was observed even after 12 h of polymeric solution preparation. The data relating physical measures of the solution such as viscosity

(375 cP), electrical conductivity (3.59 mS/cm) and surface tension (40 mN/m) were collected in triplicate and averaged at a mean temperature of 25 °C.  $ZrO_2$  nanoparticle powder weight above as-mentioned value induced clogging in some parts of the nozzle hampering fluent electrospinning process.

Injection of the polymeric solution (PVOH+ $ZrO_2$ , injection rate of 0.1 mL/h) was carried out via a 10 mL syringe with 20-gauge nozzle towards the collector (24 cm away from the nozzle) covered with aluminum foil on which the fabricated nanofibers form a web layer at a potential difference of 22.5 kV (AC). The nanofibers were firstly transferred to microscopic thin mica and subsequent to calcination process, the nanofibers

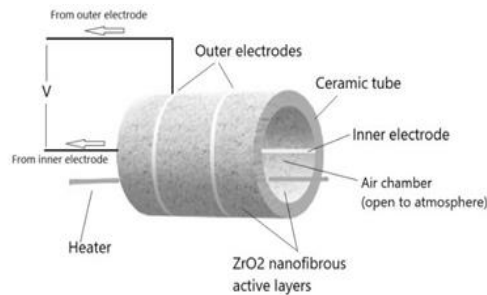
were blended with pure water in a weight ratio of 100:20 to form a paste to coat inner and outer side of the ceramic tube [40]. The experiments were conducted at relative humidity of 45-52% and temperature of 24-28 °C (Figure 2).



**Figure 2.** Illustration of the electrospinning technique

### 2.2. Calcination Process (Nanofiber Heat Pre-treatment)

Subsequent to electrospinning, the nanofiber layers underwent calcination (annealing) process at about 700 °C in a furnace to eliminate impurities within the nanofibers to increase the sensing performance. The calcined as-spun fibers were wrapped onto the outer (target gas side) and inner surface (reference air side) of the ceramic tube to form the active reaction surfaces (Figure 3).



**Figure 3.** Illustration of the nanofibrous sensor

### 2.3. Characterization of the Electrospun Fibers

As-spun nanofibers were firstly gold-coated in vacuum ambient before SEM-EDX analyses to observe the structure and morphology. Subsequently, SEM images of the nanofibers were

taken at 200000x magnification and in 500 nm scale. Characteristic FT-IR peaks were also analyzed to investigate fibers' structural behaviors.

### 2.4. Experimental Set-up

The ceramic tube with interdigitated electrodes and covered with calcined as-spun fibers was installed in a well-sealed steel chamber. The exhaust gas was sent to the chamber from an inline 4-cylinder, 3.9 liters, direct injection, turbocharged diesel test engine with maximum power of 100 kW @2900 rpm and maximum torque of 370 Nm @1600 rpm. The test engine comprises of a downpipe exhaust system (no catalytic converter, EGR, DPF, AdBlue system, etc.) with an electronically controllable valve (ECV) installed to adjust exhaust gas flow rate (Figure 4). Before each measurement, the test engine was run for a while so as to reach engine coolant regime temperature (about 70 °C) and all measurement data were collected under the engine working condition of 1750 rpm without engine load to acquire similar exhaust gas temperature of about 600-700 °C (denoted by "T" in the schematic of the set-up) for each experimental trial. Upon exposure of exhaust gas, a voltage (Nernst voltage) was generated due to the partial pressure difference of the oxygen in the air chamber (inner side) and exhaust gas (outer side) thanks to the electrolytic transporter behavior of ZrO<sub>2</sub> doped nanofibrous surface until a stable level was reached. This voltage informs about the surface electrical resistance (read from the multimeter) and defines response of the sensor ( $R_e$ ). The outer surface of ZrO<sub>2</sub> doped PVOH nanofibrous sensor was exposed to the atmosphere after each test until procuring 90% change in resistance ( $R_a$ ) which is also known as "recovery" of the sensor [10,29,41]. Thus,  $R_a/R_e$  was considered as the sensor detection performance throughout the study. Sensor detection performance was observed by varying sensor working temperature (from the sensor heater) and exhaust gas percentage introduced into the steel chamber through the ECV.

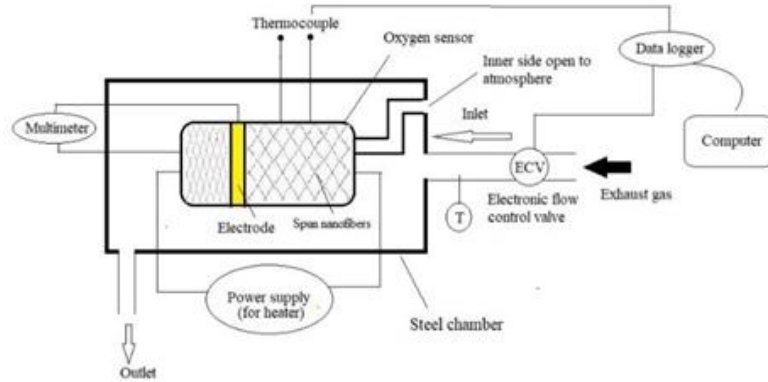


Figure 4. Illustration of the experimental set-up

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Nanofiber Characterization

Figure 5a and Figure 5b demonstrate the uniform and well-dispersed nanofiber structures of the undoped PVOH and ZrO<sub>2</sub> doped PVOH (polymeric solutions processed under electrostatic forces). It was observed that ZrO<sub>2</sub> doped PVOH nanofibers have smaller average diameters (73±8 nm) than those of the undoped PVOH nanofibers (110±12 nm). This is attributed to ionization of the solution due to the amount of metal compound providing higher electrostatic forces exerted on the polymer jet (increased

whipping instability level) in the electrospinning process, thus, thinner fibers [10,42]. To the SEM image in Figure 5c, metaloxide in the ZrO<sub>2</sub> doped PVOH nanofibers calcined at 700 °C is clearly observed in bead form and nanofibers have high endurance against high temperatures (e.g. high exhaust gas temperatures). It is also seen in the EDX graph that the chemical composition of the structure decomposes from impurities at high temperatures in the calcination process [10]. Aluminum peaks are due to accumulation of the whipped fibers onto the aluminum foil and the rest of the elements support the structure of the fabricated nanofibers (Figure 5b).

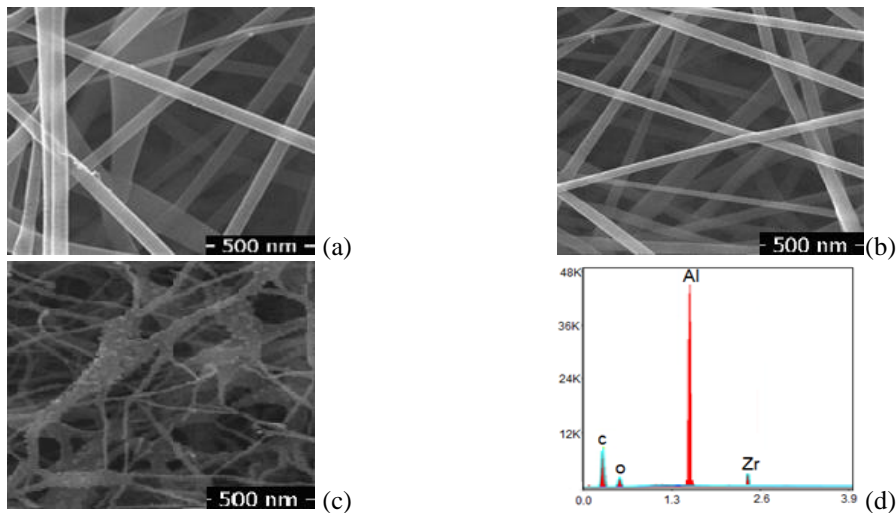
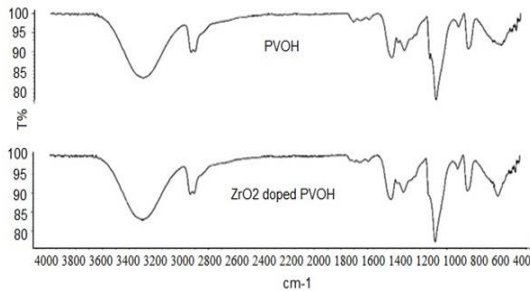


Figure 5. SEM images of the: (a) PVOH; (b) ZrO<sub>2</sub> doped PVOH; (c) ZrO<sub>2</sub> doped PVOH calcined at 700 °C; (d) EDX analysis of ZrO<sub>2</sub> doped PVOH

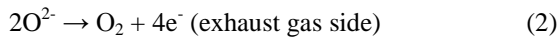
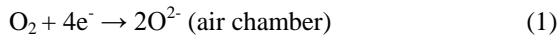
FT-IR spectrums (Figure 6) show that O-H and C-H peaks of PVOH are wide and flat at 3400 cm<sup>-1</sup> and 2900 cm<sup>-1</sup>, respectively [43]. In general, minimal shifts in PVOH may be observed in case the polymeric solution contains ZrO<sub>2</sub> metal oxide. Each metal has peculiar peaks in FTIR fingerprint region and it is 640 cm<sup>-1</sup> for ZrO<sub>2</sub>. A band around 1500 cm<sup>-1</sup> is ascribed to Zr-O vibrations of t-ZrO<sub>2</sub> [44].



**Figure 6.** FT-IR spectrums of PVOH and ZrO<sub>2</sub> doped PVOH

### 3.2. Sensing Mechanism

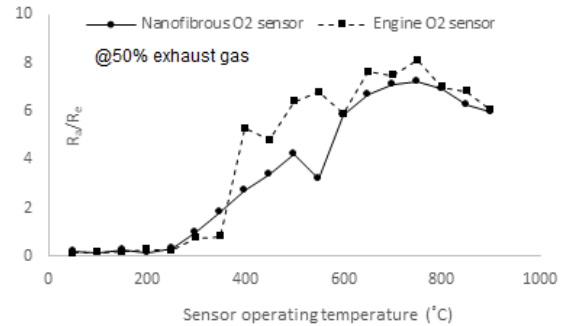
Anion (oxygen) ion vacancies provide conduction of oxygen ions through Zr<sup>4+</sup> ions. Due to almost zero electrical conductivity of stabilized zirconia at low temperatures, these sensors are to operate at minimum of 500 °C for applications. The platinum catalyst coats the inner and outer surfaces of the sensor to promote the electrochemical reactions as shown in Equations (1) and (2) (see Figure 1) [45]:



### 3.3. Sensing Performance

The working temperature of a zirconia oxygen sensor is a paramount parameter for AFR adjustment. In general, automotive zirconia oxygen sensors remain inactive during a time period after the cold start of the engine which is defined as “light-off capability”. Within this inactive time period (average of 15 s), the sensor does not operate making a drawback in terms of meeting emission standards especially for engine

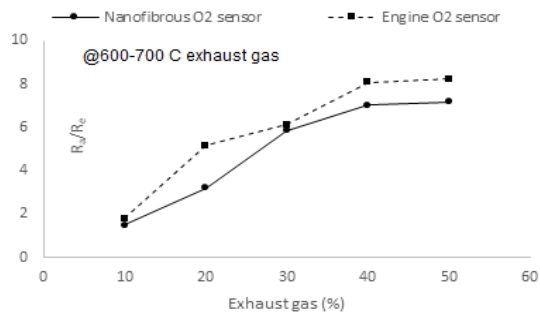
cold working conditions [26]. Figure 7 presents the variation of the sensing performance of the sensor manufactured using nanofibers calcined at 700 °C with respect to working temperature of the sensor at constant exhaust gas percentage of 50%, exhaust temperature of 600-700 °C and engine speed of 1750 rpm. The ZrO<sub>2</sub> doped PVOH nanofibrous sensor exhibits negligible R<sub>a</sub>/R<sub>e</sub> values (no response) until about 270 °C. As the temperature continues to rise, chemisorption reactions commence to accelerate and electron loss from the active surface (outer surface) provides a gradual reduction in surface electrical resistance (higher R<sub>a</sub>/R<sub>e</sub>). This phenomenon perpetuates until the surface comes to saturation (no more reaction between the active surface and the oxygen molecules within the exhaust gas). However, it is clearly seen from the Figure 7 that current zirconia oxygen sensor (EOS) responds beginning from 310 °C of operating temperature which depicts that the ZrO<sub>2</sub> doped PVOH nanofibrous sensor performs an effective operation in wider time period thanks to its larger SVR.



**Figure 7.** Sensing performance vs. sensor operating temperature

The variation of the sensors’ performances versus exhaust gas percentage under constant operating temperature is shown in Figure 8. The sensor working temperature was maintained at 750 °C since the best performances were obtained at about this temperature value for both sensors in the former stage of the study. The increment in exhaust gas sent to the ZrO<sub>2</sub> doped PVOH nanofibrous sensor yields more oxygen take place in the chemical reaction, that is, more electron loss of the active surface and lower electrical resistance

(lower  $R_c$ ). Reduction in electrical resistance results in higher sensing performance and reaches a stable value at about exhaust gas percentage of 50% showing that no more oxygen in the exhaust gas reacts with the  $ZrO_2$  doped PVOH nanofibrous sensor due to saturation.



**Figure 8.** Sensing performance vs. exhaust gas percentage

#### 4. CONCLUSIONS

An effective sensor has been designed and manufactured thanks to  $ZrO_2$  doped nanofibers with high SVR. Increment of active surface area provides more interaction of exhaust gases with the sensor surface and higher effectiveness time period. The nanofibers wrapped onto the ceramic tube were fabricated via electrospinning which is a simple and cost-effective technique. The effectiveness of the  $ZrO_2$  doped PVOH nanofibrous sensor reaches its maximum (7.24) at sensor operating temperature of about  $700\text{ }^\circ\text{C}$  which is 15% lower than that of EOS. Besides,  $ZrO_2$  doped PVOH nanofibrous sensor depicted similar oxygen concentration measurement range (0-60%). It was shown that sensor operating temperature is paramount in oxygen sensing performance and an average performance of 3.92 was obtained at under various sensor operating temperatures. Furthermore,  $ZrO_2$  doped PVOH nanofibrous sensor depicted high performance (average of 4.24) against increasing exhaust gas percentages. This study presents promising results in the context of oxygen detection alternatively for ICEs with high precision and can be a good guide for future works focusing on oxygen sensors with very rapid response-recovery time and light-off capability.

#### 5. ACKNOWLEDGMENT

The author would like to thank Cukurova University, Central Research Laboratory for their technical assistance.

#### 6. REFERENCES

1. Mun, T., Koo, J.Y., Lee, J., Kim, S.J., Umarji, G., Amalnerkar, D., Lee, W., 2020. Resistive-type Lanthanum Ferrite Oxygen Sensor Based on Nanoparticle-assimilated Nanofiber Architecture. *Sensors and Actuators: B*, 324, 1-12.
2. Li, Z., Li, H., Wu, Z., Wang, M., Luo, J., Torun, H., Hu, P., Yang, C., Grundmann, M., Liu, X., Fu, Y., 2019. Advances in Designs and Mechanisms of Semiconducting Metal Oxide Nanostructures for High-Precision Gas Sensors Operated at Room Temperature. *Materials Horizon*, 6, 470-506.
3. Hu, N., Yang, Z., Wang, Y., Zhang, L., Wang, Y., Huang, X., Wei, H., Wei, L., Zhang, Y., 2014. Ultrafast and Sensitive Room Temperature  $NH_3$  Gas Sensors Based on Chemically Reduced Graphene Oxide. *Nanotechnology*, 25, 23-32.
4. Kim, S.J., Koh, H.J., Ren, C.E., Kwon, O., Maleski, K., Yeon Cho, S.S., Anasori, B., Kim, C.K., Choi, Y.K., Kim, J., Gogotsi, Y., Jung, H.T., 2018. Metallic  $Ti_3C_2T_x$  MXene Gas Sensors with Ultrahigh Signal-to-Noise Ratio. *ACS Nanotechnology*, 12, 986-993.
5. Grassi, M., Malcovati, P., Baschiroto, A., 2005. A High-precision Wide-range front-end for Resistive Gas Sensors Arrays. *Sensors and Actuators: B*, 111-112, 281-285.
6. Ivanov, P., Llobet, E., Vilanova, X., Brezmes, J., Hubalek, J., Correig, X., 2004. Development of High Sensitivity Ethanol Gas Sensors Based on Pt-doped  $SnO_2$  Surfaces. *Sensors and Actuators: B*, 99, 201-206.
7. Kim, Y.K., Kang, H., Kim, J.K., 2016. Directly Attached Airbag Sensor Packaging for Automobiles. *Pan Pacific Microelectronics Symposium*. Big Island, Hawaii, 1-3.
8. Tian, H., Shu, Y., Wang, X.F., Mohammad, M.A., Bie, Z., Xie, Q.Y., Li, C., Mi, W.T.,

- Yang, Y., Ren, T.L., 2015. A Graphene-Based Resistive Pressure Sensor with Record-High Sensitivity in a Wide Pressure Range. *Scientific Reports*, 5, 1-6.
9. Nguyen, L.V., Warren-Smith, S.C., Ebendorff-Heidepriem, H., Monro, T.M., 2016. Interferometric High Temperature Sensor Using Suspended-core Optical Fibers. *Optics Express*, 24, 8967-8971.
10. Yilmaz, O.E., Erdem, R., 2020. Evaluating Hydrogen Detection Performance of an Electrospun CuZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanofiber Sensor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 26402-26412.
11. Seo, Y., Memon, M.U., Lim, S., 2016. Microfluidic Eighth-mode Substrate-integrated-waveguide Antenna for Compact Ethanol Chemical Sensor Application. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64, 3218-3222.
12. Aslani, A., Oroojpour, V., 2011. CO Gas Sensing of CuO Nanostructures Synthesized by an Assisted Solvothermal Wet Chemical Route. *Physica B: Condensed Matter*, 406, 144-149.
13. Nagarajan, V., Chandiramouli, R., 2019. Detection of Trace Level of Hazardous Phosgene Gas on Antimonene Nanotube Based on First-principles Method. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 88, 32-40.
14. Van Hoang, N., Hung, C.M., Hoa, N.D., Van Duy, N., Van Hieu, N., 2018. Facile On-chip Electrospinning of ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanofiber Sensors with Excellent Sensing Performance to H<sub>2</sub>S Down ppb Level. *Journal of Hazardous Materials*, 360, 6-16.
15. Bhattacharjee, S., Roy, P., Ghosh, S., Misra, S., Obaidat, M.S., 2012. Wireless Sensor Network-based Fire Detection, Alarming, Monitoring and Prevention System for Bord-and-Pillar Coal Mines. *Journal of System and Softwares*, 85, 571-581.
16. Iguchi, S., Mitsubayashi, K., Uehara, T., Ogawa, M., 2005. A Wearable Oxygen Sensor for Transcutaneous Blood Gas Monitoring at The Conjunctiva. *Sensors and Actuators: B*, 108, 733-737.
17. Chatburn, R.L., Williams, T.J., 2010. Performance Comparison of 4 Portable Oxygen Concentrators. *Respiratory Care*, 55, 433-442.
18. Fleming, W.J., 2001. Overview of Automotive Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 1, 296-308.
19. Grace, R.H., 2001. Application Opportunities of MEMS/MST in the Automotive Market: The Great Migration from Electromechanical and Discrete Solutions, Springer, Berlin, 1-16.
20. Hoffman, D., Rizzo, M., 1998. Chevrolet C5 Corvette Vehicle Dynamic Control System. SAE Technical Paper, 980233, 1-8.
21. Eddy, D., Sparks, D., 1998. Application of MEMS Technology in Automotive Sensors and Actuators. *Proceeding IEEE*, 86, 1747-1755.
22. Frank, R., 1998. Future Sensing in Vehicle Applications. *Sensors and Transducers*, 25, 36-45.
23. Litzelman, S.J., Rothschild, A., Tuller, H.L., 2005. The Electrical Properties and Stability of SrTi<sub>0.65</sub>Fe<sub>0.35</sub>O<sub>3-δ</sub> thin Films for Automotive Oxygen Sensor Applications. *Sensors and Actuators: B*, 108, 231-237.
24. SST Sensing: Zirconium Dioxide (ZrO<sub>2</sub>) Oxygen Sensor Operating Principle Guide. [https://sstsensing.com/wpcontent/uploads/2016/05/AN0043\\_rev5\\_Zirconia-Sensor Operating-Principle and Construction-Guide.pdf](https://sstsensing.com/wpcontent/uploads/2016/05/AN0043_rev5_Zirconia-Sensor Operating-Principle and Construction-Guide.pdf) 2017. Accessed 10 February 2021
25. Ritter, T., Hagen, G., Lattus, J., Moos, R., 2018. Solid State Mixed-potential Sensors as Direct Conversion Sensors for Automotive Catalysts. *Sensors and Actuators: B*, 255, 3025-3032.
26. Riegel, J., Neumann, H., Wiedenmann, H.M., 2002. Exhaust Gas Sensors for Automotive Emission Control. *Solid State Ionics*, 152-153, 783-800.
27. Bektas, M., Stocker, T., Mergner, A., Hagen, G., Moos, R., 2018. Combined Resistive and Thermoelectric Oxygen Sensor with Almost Temperature-independent Characteristics. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 7, 289-297.
28. Wiedenmann, H.M., Hotzel, G., Neumann, H., Riegel, J., Stanglmeier, F., Weyl, H., 1999. Exhaust gas sensors, *Automotive Electronics Handbook*. McGraw-Hill, New York.
29. Xu, X., Sun, J., Zhang, H., Wang, Z., Dong, B., Jiang, T., Wang, W., Li, Z., Wang, C., 2011. Effects of Al Doping on SnO<sub>2</sub> Nanofibers in



- Hydrogen Sensor. *Sensors and Actuators: B*, 160, 858-863.
30. Huang, J., Wan, Q., 2009. Gas Sensors Based on Semiconducting Metal Oxide One-dimensional Nanostructures. *Sensors*, 9, 9903-9924.
  31. Comini, E., Faglia, G., Sberveglieri, G., 2002. Stable and Highly Sensitive Gas Sensors Based on Semiconducting Oxide Nanobelts. *Applied Physics Letters*, 81, 1869-1871.
  32. Erdem, R., Yuksek, M., Sancak, E., Atak, O., Erginer, M., Kabasakal, L., Beyit, A., 2017. Electrospinning of Single and Multilayered Scaffolds for Tissue Engineering Applications. *Journal of Textile Institute*, 108, 935-946.
  33. Budun, S., Isgoren, E., Erdem, R., Yuksek, M., 2015. Morphological and Mechanical Analysis of Electrospun Shape Memory Polymer Fibers. *Applied Surface Science*, 380, 294-300.
  34. Erdem, R., Akalin, M., 2015. Characterization and Evaluation of Antimicrobial Properties of Electrospun Chitosan/Polyethylene Oxide Based Nanofibrous Scaffolds (with/without Nanosilver). *Journal of Industrial Textiles*, 44, 553-571.
  35. Erdem, R., Ilhan, M., Sancak, E., 2015. Analysis of EMSE and Mechanical Properties of Sputter Coated Electrospun Nanofibers. *Applied Surface Science*, 380, 326-330.
  36. Erdem, R., Usta, I., Akalin, M., Atak, O., Yuksek, M., Pars, A., 2015. The Impact of Solvent Type and Mixing Ratios of Solvents on The Properties of Polyurethane Based Electrospun Nanofibers. *Applied Surface Science*, 334, 227-230.
  37. Shahabuddin, M., Umar, A., Tomar, M., Gupta, V., 2017. Custom Designed Metal Anchored SnO<sub>2</sub> Sensor for H<sub>2</sub> Detection. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 4597-4609.
  38. Yamazo, N., 1991. New Approaches for Improving Semiconductor Gas Sensors. *Sensors and Actuators: B*, 5, 7-19.
  39. Yamazo, N., Shimano, K., 2009. New Perspectives of Gas Sensor Technology. *Sensors and Actuators: B*, 138, 100-107.
  40. Liu, L., Li, S., Zhuang, J., Wang, L., Zhang, J., Li, H., Liu, Z., Han, Y., Jiang, X., Zhang, P., 2011. Improved Selective Acetone Sensing Properties of Co-doped ZnO Nanofibers by Electrospinning. *Sensors and Actuators: B*, 155, 782-788.
  41. Liang, Y.X., Chen, Y.J., Wang, T.H., 2004. Low-resistance Gas Sensors Fabricated from Multiwalled Carbon Nanotubes Coated with a Thin Tin Oxide Layer. *Applied Physics Letters*, 85, 666-668.
  42. Sancak, E., Ozen, M.S., Erdem, R., Yilmaz, A. C., Yuksek, M., Soin, T., Shah, T., 2018. PA6/Silver Blends: Investigation of Mechanical and Electromagnetic Shielding Behavior of Electrospun Nanofibers. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 28, 229-235.
  43. Kharazmi, A., Faraji, N., Mat Hussin, R., Saion, E., Yunus, W.M.M., Behzad, K., 2015. Structural, Optical, Opto-Thermal and Thermal Properties of Zns-PVA Nanofluids Synthesized Through Aradiolytic Approach. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6, 529-536.
  44. Madhusudhan, H.C., Shobhadevi, S.N., Nagabhushana, B.M., Chaluvvaraju, B.V., Murugendrappa, M.V., Krishna, R.H., Nagabhushana, H., Radeep, N.R., 2016. Effect of Fuels on Conductivity, Dielectric and Humidity Sensing Properties of ZrO<sub>2</sub> Nanocrystals Prepared by Low Temperature Solution Combustion Method. *Journal of Asian Ceramics Society*, 4, 309-318.
  45. Sjöholm, P., Ingham, D.B., Torvela, H., 2001. *Gas Cleaning Technology, Industrial Ventilation Design Guidebook*, Elsevier, 1197-1316.





## Optimization of Urban Cargo Distribution Network and Station Points with Open Source GIS

Şevket BEDİROĞLU\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-7216-6910

<sup>1</sup>Gaziantep University, Faculty of Architecture, City and Regional Planning Department, Gaziantep

Geliş tarihi: 27.07.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: BEDİROĞLU, Ş., (2021). Optimization of Urban Cargo Distribution Network and Station Points with Open Source GIS. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 989-995.

### Abstract

The cargo and transportation sector is growing day by day. Resources need to be managed more efficiently in the face of growth in the sector and fast delivery demand in customer requests. Location selection of cargo branches and route planning processes of cargo vehicles are important in order to manage resources more efficiently. Geographic Information Systems (GIS) provide significant advantages in site selection and route planning processes. Especially open source GIS data and GIS software offer low cost and effective solutions. In this study, the branch locations of a cargo company in Şhitkamil district of Gaziantep province were examined and the routes of the vehicles were analyzed in a way to minimize time loss and fuel consumption. In this context, isochrone maps were produced over the road network. The population numbers within these isochrone zones were calculated and vehicle liability zones were determined according to the population data. Finally, the daily route planning of more than a hundred cargoes, which are required to be delivered by cargo vehicles in one day, has been made.

**Keywords:** GIS, Open source GIS, Cargo and transportation, Isochrone maps

### Açık Kaynak CBS ile Şhiriçi Kargo İstasyon Noktalarının Optimizasyonu ve Dağıtım Planlaması

#### Öz

Kargo ve taşımacılık sektörü her geçen gün daha da büyümektedir. Sektördeki büyüme ve müşteri isteklerindeki hızlı teslimat talebi karşısında kaynakların daha verimli yönetilmesi gerekmektedir. Kaynakların daha verimli yönetilebilmesi için kargo şubelerinin yer seçimi ve kargo araçlarının güzergah planlama süreçleri önem arz etmektedir. Yer seçimi ve güzergah planlama sürecinde Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle açık kaynak kodlu CBS verileri ve CBS yazılımları düşük maliyetli ve etkin çözümler sunmaktadır. Bu çalışmada Gaziantep ilinin Şhitkamil ilçesinde bir kargo firmasının şube yerleri irdelenmiş ve araçlara ait güzergahlar zaman kaybını ve yakıt

---

\*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Şevket BEDİROĞLU, [sevketbediroglu@gmail.com](mailto:sevketbediroglu@gmail.com)

tüketimini en aza indirecek şekilde analiz edilmiştir. Bu kapsamda yol ağı üzerinden isochrone haritalar üretilmiş. Bu isochrone bölgeleri içerisinde var olan nüfus sayıları hesaplanmış ve nüfus verilerine göre araç sorumluluk bölgeleri belirlenmiştir. Son olarak ta kargo araçlarının bir gün içerisinde teslimat yapması gereken yüzün üzerinde kargonun günlük rota planlaması yapılmıştır.

**Keywords:** CBS, Açık kaynak CBS, Kargo ve taşımacılık, Isochrone harita

## 1. INTRODUCTION

The increasing mobility of people represents another constraint to successful delivering. E-commerce brings changes to consumer behavior and parcel delivery requirements in regard to reliability, speed, mobility and proximity [1]. E-commerce has increased in recent years and reached its peak due to the pandemic for the last 2 years. According to the forecasts, the need for the cargo sector will increase due to e-commerce and other causes in the following years. Smart transportation systems should be used due to increasing needs and high demand for effective resource management. Some important components of smart transportation systems are the site selection (location) of cargo stations and daily route planning.

The most significant reason for applying network analysis and route planning to transportation is that businesses are interested in determining the best routes to minimize cost and time [2, 3]. Logistic problems are common to many industry segments; thus, many applications for GIS in addressing or supporting logistical problem solving can be cited [4].

GIS can both model transportation networks, and integrate the association of network characteristics directly into a database. In this regard, finding the fast routes for the delivery of fresh vegetables takes into account different parameters as its impedance [3]. Combining GIS and Decision Support Systems provides us with the advantages of both and allows a better modeling of the vehicle routing problem which is also a spatial problem [5]. The integration of logistical constraints is inevitable in the context of sustainable development, because it optimizes the exchange of

physical flows between the links and it helps to resolve the localization problem [6].

In recent literature there are various successful studies at related areas. Some of these studies are shown in Table 1. Abousaeidi et al., 2016 [3] have researched GIS based methods for determining fastest delivery routes. Akter et al., 2018 [7] have studied on, open source GIS tools for determining freight activity patterns. Azaz, 2011 [4] has investigated role of GIS in logistics and other business sectors. Widoningram, 2015 [8] has studied on GIS based approach for catchment and service area analysis. Wong et al., 2020 [9] have focused on sustainable freight transportation with graph-theory based road connectivity assessment. Yu et al., 2015 [10] have focused on implementation of GIS based smart logistics. Yücel and Ulutaş, 2009 [11] have studied site selection of cargo stations with GIS and MCDM. Chandro et al., 2019 [12] have studied freight transportation planning with GIS based approach. EL Raouini et al., 2018 [5] have studied freight distribution and transportation planning with GIS based approach. Chiquileri et al., 2019 [13] have focused on GIS based solution for vehicle routing problem. Kazhakmetov and Zakiev, 2020 [14] aimed implementing GIS technologies for logistics management.

Timely delivery of cargo and optimum management of resources in urban cargo transportation is an important problem concerning spatial sciences. At this point, GIS has provided effective tools from the past to the present. Today, there are new generation open source data sets and analysis programs that are highly efficient, easy to use and economical. The main purpose of the study is to make urban cargo transportation processes more efficient with these new generation systems. With the developed system, time and fuel consumption were tried to be reduced.

**Table 1.** Literature review

Author(s)-Date	Subject, purpose or methodology
Abousaeidi et al., 2015	GIS based methods for determining fastest delivery routes
Akter et al., 2018	Open source GIS tools for determining freight activity patterns
Azaz, 2011	Investigated role of GIS in logistics and other business sectors
Widoningram, 2015	GIS based approach for catchment and service area analysis
Wong et al., 2020	Sustainable freight transportation with graph-theory based road connectivity assessment
Yu et al., 2015	Implementation of GIS based smart logistics
Yücel and Ulutaş, 2010(?trh)	Site selection of cargo stations with GIS and MCDM
Chandro et al., 2019	Freight transportation planning with GIS based approach
EL Raouini et al., 2018	Freight distribution and transportation planning with GIS based approach
Chiquileri et al., 2019	GIS based solution for vehicle routing problem
Kazhakmetov and Zakiev, 2020	Implementing GIS technologies for logistics management

## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Study Area

Şehitkamil district of Gaziantep province was chosen as the study area. Şehitkamil is a district of Gaziantep Province of Turkey (Figure 1). It is part of Gaziantep Metropolitan Municipality. The

district has an area of 1,268 km<sup>2</sup>. Population of the district is 726,000 according to the 2015 census. Gaziantep OSB, which is among the largest organized industrial zones in Turkey, is located in the district, as well as an intense urbanization and housing area. The district has an intense activity in terms of logistics and transportation activities, both individually and institutionally.

**Figure 1.** Study area

## 2.2. Data Used and Produced Within the Scope of the Study

The geographical data used and produced within the scope of the study are as follows. First of all, the road network map of the study area was provided to include width, traffic density and direction information. The points belonging to the cargo company were determined and entered into the GIS environment. The building and population data in the region were taken instantly from open source data systems (OSM).

## 2.3. Determination of Optimum Location Selection Methods, Efficiency Analysis of Branch Locations

Choosing the right station point is one of the most important components of cargo companies in their urban distribution processes. The heterogeneous distribution of stations without considering population and traffic data will cause problems in

resource management. There are different GIS-based alternative methods for site selection. Methods such as multi-criteria decision making, service area layer, and accessibility analysis are among the efficient methods frequently encountered in the literature. In this study, isochrone maps of each existing station were created by creating a balance between the traffic and population in the road network while choosing the cargo stations location. An isochrone map in geography and urban planning is a map that depicts the area accessible from a point within a certain time threshold [15]. Isochrone maps are especially used to produce simultaneous driving maps. Application areas has diversity such as public transportation, cargo planning, address accessibility, school shuttle-vehicle route planning, hiking trip planning. There are different production methods such as raw point layer, 2d interpolation, Alpha shapes and convex hull. Figure 2 shows the isochrone maps of each station.

Study Area and Isochrone Zones Calculated over Road Network



Figure 2. Isochrone map of current and suggested stations in study area

#### 2.4. Determination of Responsibility Areas of Vehicles

There are 6 to 8 vehicles on average at cargo stations in Turkey, and each vehicle carries approximately 100 goods during the day. During the pandemic process, the number of urban goods transported on a vehicle basis sometimes exceeded

150. In such intense processes and in general use, it is important to analyze the responsibility areas of cargo vehicles correctly. In order to solve this problem efficiently, the access zones of the cargo vehicles at 5, 10 and 15 minutes distance and the population values in these access zones are calculated over open route service (Figure 3).

#### Station 1 Temporal Truck Driving Areas and Populations in Temporal Isochrone Areas

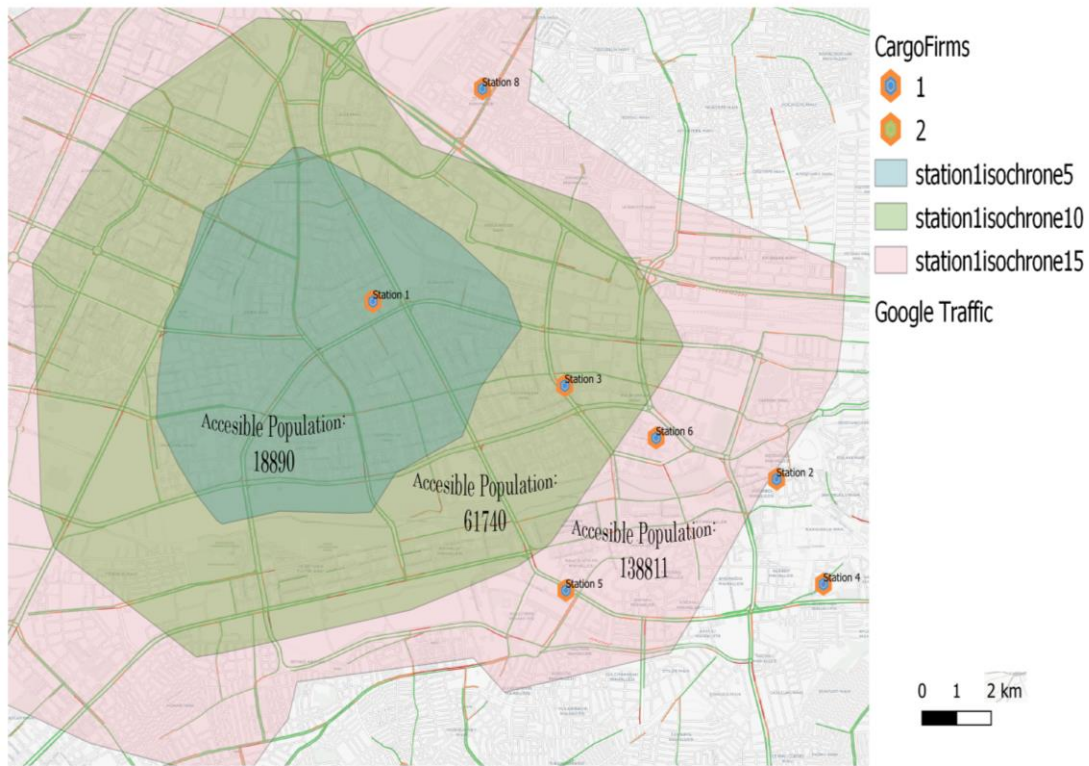


Figure 3. Temporal access zones of stations and population in zones

#### 2.5. Preparation of Detailed Distribution Plans of Vehicles According to the Road Network

At this stage, the most important problem is to plan the distribution plan of cargoes, whose daily geographical distribution consists of different points, in a way that reduces time and fuel loss. The daily cargo data is not in a static structure, but

in a dynamic structure data is updated every day. The route that the cargo allocated to the vehicles will follow during the day will significantly affect the efficiency. In order to solve this critical problem, network analyzes were made over the road route and distribution plans were prepared (Figure 4). In addition, the distance matrix was calculated between the daily cargoes and the cargo route.



## Parcel / Cargo Distrubution Plan of a Truck for One Chosen Day



Figure 4. Optimized daily cargo route

### 3. DISCUSSION AND RESULTS

The importance of the logistics cargo sector has been increasing in recent years and the sector continues to grow, especially with the pandemic process. Factors such as the location of cargo stations and the correct planning of the routes of cargo vehicles have critical importance in the process. The developed system and the rich geographic analysis capabilities offered by the GIS from the past to the present have further increased its functionality. Today, using web-based GIS systems that enable instant decision making process makes significant contributions. At this point, open source data, web services and open source programs are in a position to make critical contributions to the business world.

The isochrone maps produced with the developed system and case studies provide significant advantages over the classical buffer method in the decision-making process. Thanks to isochrone maps, alternatives that establish ideal correlations

between population, road length and traffic density parameters can be produced.

Open source data is changing business models because it is available at any time. The selection of the study area reduces the difficulties in the data acquisition process in the analysis and decision-making processes. On the other hand, although some data have some deficiencies in terms of reliability and verification, verification systems are developed day by day and errors are reduced.

Finally, studies have shown that GIS is an important tool for cargo companies that want to reduce losses by making resource management more efficient and increase customer satisfaction by reducing time losses.

### 4. REFERENCES

1. İndap, Ş., 2019. The Status of Cargo Companies in E-Commerce Logistics and Innovative Solution Proposals to Improve



- Their Competitiveness. *Girişimcilik ve İnovasyon Yönetim Dergisi*, 8(2), 39-67.
2. Memon, I. A., 2005. Application of Geographic Information System in Transportation for Road Network Analysis (M.Sc). Universiti Teknologi Malaysia, Faculty of Civil Engineering.
  3. Abousaeidi, M., Fauzi R., Muhamad, R., 2016. Geographic Information System (GIS) Modeling Approach to Determine the Fastest Delivery Routes. *Saudi J Biol Sci* 23:555–564. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.06.004>.
  4. Azaz L., 2011. The Use of Geographic Information Systems (GIS) in Business. *International Conference on Humanities, Geography and Economics (ICHGE'2011)* Pattaya Dec., 2011
  5. El Raoui H, Oudani M, Alaoui AEH., 2018. ABM-GIS Simulation for Urban Freight Distribution of Perishable Food. *MATEC Web Conf*.
  6. Sassi, E., Benabdelhafid, A., 2020. The Complexity of the Territorial Logistics Ecosystem. *13ème Conference Internationale de Modelisation, Optimisation et Simulation (MOSIM2020)*, 12-14 Nov 2020, AGADIR, Maroc, Nov 2020, AGADIR (virtual), Morocco.
  7. Akter, T., Hernandez, S., Diaz Corro, K., Ngo, C., 2018. Leveraging Open-source GIS Tools to Determine Freight Activity Patterns from Anonymous GPS Data.
  8. Widaningrum, D.L., 2015. A GIS-based Approach for Catchment Area Analysis of Convenience Store. *Procedia Comput Sci* 72, 511–518.
  9. Wong, E.Y.C., Tai, A.H., So, S., 2020. 'Container Drayage Modelling with Graph Theory-based Road Connectivity Assessment for Sustainable Freight Transportation in New Development Area. *Computers and Industrial Engineering*, 149(106810), 1-11. [doi.org/10.1016/j.cie.2020.106810](https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106810).
  10. Yu, Y.W., Jung, H., Bae, H., 2015. Integrated GIS-based Logistics Process Monitoring Framework with Convenient Work Processing Environment for Smart Logistics. *ETRI J* 37, 306–316. [doi.org/10.4218/etrij.15.2314.0056](https://doi.org/10.4218/etrij.15.2314.0056).
  11. Yücel, M.M., Ulutaş, A., 2009. Çok Kriterli Karar Yöntemlerinden Electre Yöntemiyle Malatya'da Bir Kargo Firması için Yer Seçimi. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, no.17, 327-344.
  12. Chandra, A., Pani, A., Sahu, P.K., 2020. Designing Zoning Systems for Freight Transportation Planning: A GIS-based Approach for Automated Zone Design Using Public Data Sources. *Transp Res Procedia* 48:605–619. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.063>.
  13. Cecílio, I., Chiquieri, J., Freitas, R., Goncalves, W., 2019. Holistic Analysis of the Vehicle Routing Problem: an Approach for GIS-T. *Int J Adv Eng Res Sci*, 6, 116–131. <https://doi.org/10.22161/ijaers.69.13>.
  14. Kozhakhmeto, S., Zakiev, E., 2020. Possible Ways to Implement GIS Technologies in the Logistics Management System in Order to Improve Management Efficiency. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)* Volume 11, Issue 12, December 2020, 1546-1554.
  15. Allen, J., 2018. Using Network Segments in the Visualization of Urban Isochrones. *Cartogr Int J. Geogr. Inf Geovisualization*, 53, 262–270. <https://doi.org/10.3138/cart.53.4.2018-0013>.



## An Investigation on Decomposition of Signals and Noise Removal with a Half Band Nyquist Filter

İclal ÇETİN TAŞ<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0002-1101-9773  
Sami ARICA<sup>2</sup> ORCID 0000-0002-3820-029X

<sup>1</sup>Ostim Technical University, Faculty of Engineering, Department of Software Engineering,  
Ankara

<sup>2</sup>Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-  
Electronics Engineering, Adana

Geliş tarihi: 09.07.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: TAŞ, I.Ç., ARICA, S., (2021). An Investigation on Decomposition of Signals and Noise Removal with a Half Band Nyquist Filter. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 997-1004.

### Abstract

Medical signal processing is often used for analyzing and detecting diseases from bio-signals. Segmentation, filtering, and noise removal are application examples in this area. The segmentation or decomposition of signals is investigated in this study. Each branch of two band quadrature-mirror orthogonal filter bank structure (analysis and synthesis parts are cascaded) is a half band Nyquist filter when down-up samplers are removed. To perform partitioning, one branch of the filter bank was adapted to a component of input signal to suppress the other element and filter out the target part of the signal. This was done by obtaining the filter-tap weights, which minimize  $L_1$  - norm of error at the output. This goal was achieved by employing the exhaustive search method. The filter performance was tested for three scenarios: filtering with and without down-up samplers and wavelet de-noising using one-level decomposition. The comparison was done with Daubechies and Symlet filters. The approach was run and tested for separating synthetically generated evoked potential from noise, and the results show that the designed filter achieves lower total absolute error than the classical wavelet filters.

**Keywords:** Exhaustive search, Filter bank, Noise removal, Nyquist filter, Signal decomposition

### Yarım Bant Nyquist Filtre ile Sinyallerin Ayrıştırılması ve Gürültünün Giderilmesi Üzerine Bir Araştırma

### Özet

Medikal sinyal işleme sıklıkla biyo-sinyalleri analiz etmek ve onlardan hastalıkların tespitinde kullanılır. Bölütleme, filtreleme ve gürültü giderme bu alandaki uygulama örnekleridir. Bu çalışmada sinyallerin bölütlenmesi veya ayrıştırılması incelenmiştir. İki bantlı çeyrek ayna ortogonal filtre çatısına ait yapının

---

\*Sorumlu (Corresponding author) yazar: İclal ÇETİN TAŞ, [iclal.cetintas@ostimteknik.edu.tr](mailto:iclal.cetintas@ostimteknik.edu.tr)

her bir dalı (analiz ve sentez bölümleri seri bağlıdır), aşağı ve yukarı örnekleyiciler çıkarıldığında yarım bant Nyquist filtresidir. Ayrıştırma gerçekleştirmek amacıyla, süzgeç çatısının bir dalı, işaretin bir bileşenini bastırarak ve diğer bileşenini elde etmek için bir hedef işarete uyarlanmıştır. Bu işlem çıkışta  $L_1$  - hata normunu en aza indiren filtre ağırlıkları elde edilerek yapılmıştır. Bu hedefe, kapsamlı arama yöntemi kullanılarak ulaşılmıştır. Filtre performansı üç senaryo için test edilmiştir: aşağı ve yukarı örnekleyiciler ile bunlar olmadan filtreleme ve tek seviyeli ayrıştırma kullanarak dalgacık gürültü giderme. Önerilen yöntemle elde edilen filtre, Daubechies ve Symlet filtreleri ile karşılaştırılmıştır. Yaklaşım yapay olarak oluşturulan uyarılmış potansiyelini gürültüden ayırmak için çalıştırılmış ve test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan filtrenin klasik dalgacık filtrelerinden daha düşük toplam mutlak hata sağladığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kapsamlı arama, Süzgeç çatısı, Gürültü giderme, Nyquist süzgeci, sinyal ayrıştırma

## 1. INTRODUCTION

Biomedical signals are commonly used for understanding functionality of the body and diagnosis of diseases. These signals may contain specific patterns such as QRS wave [1] in an electrocardiogram (ECG) and evoked potential in an electroencephalogram (EEG), which are vital for analysis and diagnosis [2,3]. However, there are different types of noises in biomedical signals, which mask patterns, and they may cause mistakes in diagnosing and analysis steps. For that reason, researchers need to remove undesired parts of the signal. So, filters are required to reduce noise. The filter banks have received attention and frequently employed in noise reduction.

A filter bank is a group of parallel low-pass, band-pass and high-pass filters that separate the input signal into multiple components, each one carrying a single frequency sub band of the original signal [4,5]. In the present work, we are going to benefit from a two-channel filter bank [6]. The process of decomposition performed by the filter bank is called analysis. The reconstruction process is named synthesis, meaning reconstitution of a complete signal resulting from the filtering process. The wavelet transform-based noise cancellation methods are application of two band filter banks and more successful than linear filtering techniques [7,8]. In this study, we considered a signal as a sum of two components: base and background or noise. An orthogonal two band filter-bank system embodying cascaded

analysis and synthesis parts was employed, and one branch was matched to the base signal so that this connection filters out the base and other branch separates the background signal from the composite signal. So as to obtain the filter tap-weights, which minimize  $L_1$ -norm of error, the best solution among the other results satisfying perfectly reconstruction conditions of a quadrature-mirror filter-bank (QMF) was chosen, namely brute-force approach was used to find a solution. The proposed technique has been demonstrated by using a typical synthetic evoked potential signal.

This study consists of seven parts. First part is introduction which gives literature information for comparison our study. In second and third ones include the proposed method explanation and method's mathematical model with its details. The fourth and fifth ones consist experimental procedure and result investigation. The last part of before the reference is conclusion.

## 2. MATERIAL AND METHOD

Because the Nyquist filter is based on the filters of a two-band filter bank system, the two-band filter bank structure has been revisited.

### 2.1. Two Band Filter Bank

A two-band filter-bank system consisting of the analysis and synthesis components is shown in Figure 1.

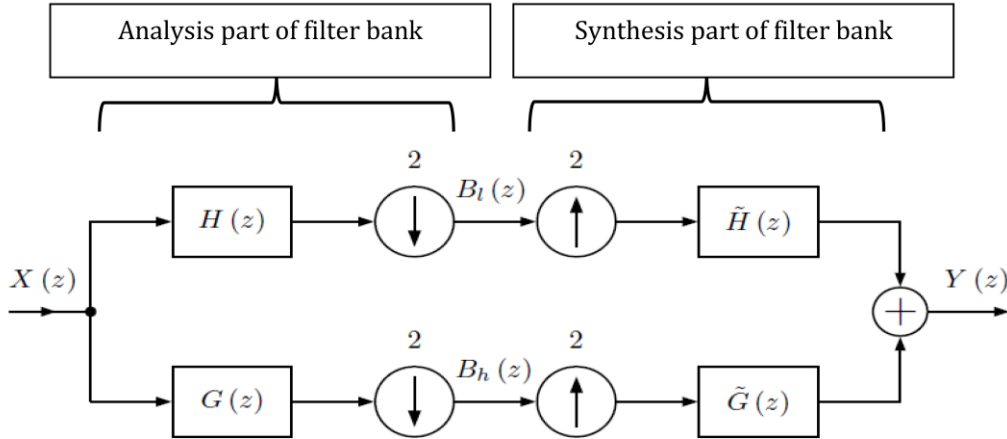


Figure 1. A two band filter bank with analysis and synthesis sections

The z-domain input-output relationship is as follows.

$$Y(z) = \frac{1}{2}T(z)X(z) + \frac{1}{2}A(z)X(-z) \quad (1)$$

In this equation

$$T(z) = H(z)\tilde{H}(z) + G(z)\tilde{G}(z) \quad (2)$$

$$A(z) = H(-z)\tilde{H}(z) + G(-z)\tilde{G}(z) \quad (3)$$

$T(z)$  is named as transfer function, and  $A(z)$ , will be called aliasing contribution (part), excluding the factor  $\frac{1}{2}$  in Equation (1). For orthogonal system consisting of finite impulse response filters:

$$H(z) = z^{-N}H(z^{-1}) \quad (4)$$

$$\tilde{G}(z) = z^{-N}G(z^{-1}) \quad (5)$$

where  $N$  is the filter order. If the function and the aliasing part are arranged according to this selection,

$$T(z) = z^{-N}[H(z)H(z^{-1}) + G(z)G(z^{-1})] \quad (6)$$

$$A(z) = z^{-N}[H(-z)H(z^{-1}) + G(-z)G(z^{-1})] \quad (7)$$

In addition, if  $G(z)$  is chosen as the quadrature mirror of  $H(z)$  as described in the following, the aliasing components disappears when  $N$  is odd, that is  $A(z) = 0$ .

$$G(z) = z^N H(-z^{-1}) \quad (8)$$

Hence the transfer function becomes:

$$T(z) = z^{-N}P(z) \quad (9)$$

$$P(z) = H(z)H(z^{-1}) + H(-z)H(-z^{-1}) \quad (10)$$

If  $P(z) = 2$ , a perfect reconstruction is obtained, and the output turns into shifted version of the input:

$$Y(z) = z^{-N}X(z) \quad (11)$$

Consequently, the perfect reconstruction condition in  $z$  and time domains are as follows.

$$H(z)H(z^{-1}) + H(-z)H(-z^{-1}) = 2 \quad (12)$$

$$\sum_{n=0}^{N-2k} h(n)h(n-2k) = \delta(n) \quad k=1,2, \frac{N+1}{2} \quad (13)$$

More details about two-band quadrature filter bank can be found in [2,3]. Set  $B_h(z) = 0$  in Figure 1;

this equivalent to setting  $G(z)$  to zero in Equation (6), Equation (7). This yield

$$Y(z) = \frac{1}{2} z^{-N} H(z) H(z^{-1}) X(z) \quad (14)$$

where,

$$P_1(z) = H(z) H(z^{-1}) + H(-z) H(-z^{-1}) \quad (15)$$

$$A_1(z) = z^{-N} H(-z) H(-z^{-1}) \quad (16)$$

The term  $A_1(z)X(-z)/2$  in the right side of Equation (14) is a residual aliasing.

### 2.2. Two Band Filter Bank Without Down and Up Samplers

When down and up-samplers operations are removed from analysis and synthesis procedure (Figure 1) the aliasing term in Equation (1) disappears and the input-output relation in  $z$  domain becomes

$$Y(z) = T(z)X(z) \quad (17)$$

By substituting Equation (9) in Equation (17), we have

$$Y(z) = z^{-N} P(z)X(z) \quad (18)$$

The perfectly reconstruction condition given in Equation (13) remains valid in this case too. However, the output becomes double of the input in contradistinction of the previous situation:

$$Y(z) = 2z^{-N} X(z) \quad (19)$$

As it has been done in the previous sub-section setting  $B_h(z)$  to 0 (equivalently  $G(z) = 0$ ) yields

$$B_h(z) = z^{-N} P_1(z)X(z) \quad (20)$$

It should be emphasized that there is no residual aliasing energy since down and up-samplers were

removed.  $P_1(z)$  is a symmetric polynomial of  $z$  and has only even powers of  $z$ . It should be noted that  $P_1(z)$  fulfils properties of a half band Nyquist filter [9].

### 3. SIGNAL/PATTERN DECOMPOSITION

Many signals, including medical ones can be modelled as the sum of a pattern and background (or clear signal plus noise) signals:

$$x(n) = p(n) + b(n) \quad (21)$$

Here  $p(n)$  is the pattern;  $b(n)$  is the background signal. Suppose this signal is applied to the filter bank shown in Figure 1, and the pattern-energy mostly resides in  $B_1(z)$  and the background-energy in  $B_h(z)$ . When  $B_h(z) = 0$ ,  $Y(z)$  becomes a shifted version of the pattern if residual aliasing is ignored. In this case, if  $H(z)$  is designed by minimizing  $L_1$ -norm of error between the filter bank output and the pattern signal, a two-band filter bank satisfying segmentation of the signal is obtained. This issue is a constraint optimization problem. It is described in the following.

If  $B_h(z) = 0$ , (Equation 14) output signal in time-domain is

$$y(n) = \frac{1}{2} x(n+N) * h(n) * h(-n) \quad (22)$$

$$+ \frac{1}{2} x(n+N) * (-1)^n h(n) * h(-n)$$

and when there is no up-down sampling (Equation 20) it turns into

$$y(n) = x(n+N) * h(n) * h(-n) \quad (23)$$

where  $*$  is the convolution operator. To suppress noise signal and obtain a filter bank matched to the pattern we employ following optimization algorithm. Here Equation (25) is perfectly reconstruction condition and Equation (26) is for

completely suppressing frequency at  $\omega = \pi \text{rad/s}$ . This approach allows designing filter  $H(z)$  by attaining minimum  $L_1$ -norm of error between the target and filtered signals  $L_1$ -norm is preferred instead of  $L_2$ -norm for error calculation and is used as objective function because it produces a sparse solution and is robust against outliers [10]. However, there can be a high-frequency component (fluctuations) in the decomposed signal due to the aliasing component which is not overthrown when standard form of the filter bank is employed. Because Equation (24) is not smooth, the derivative of it does not exist at about its minimum, and therefore, a gradient-free method should be adopted.  $y(n)$  is computed by Equation (22), Equation (23).

$$\min_{h(n)} \sum_n |p(n) - y(n)| \quad (24)$$

Subject to

$$\sum_{n=0}^{N-2k} h(n)h(n-2k) = \delta(k) \quad (25)$$

$$k=0,1,\dots,(N+1)/2$$

$$\sum_{n=0}^{N-2k} (-1)^n h(n) = 0 \quad (26)$$

### 3.1. Finding an Optimal Solution with Exhaustive Search

To obtain as much as the best solution, the exhaustive search approach was employed. The exhaustive search (brute force method) is straightforward, which try to calculate all possible solutions and decides afterwards which one is the best. This method is feasible generally for small-scale problems, since the number of possibilities of the system increases exponentially with the number of dimensions. It has wide applicability and is known for its simplicity. First, a set of (all

possible) solutions satisfying the perfect reconstruction conditions in Equation (25) and the requirement in equation Equation (26) were generated, and next objective function in Equation (24) was computed for all solutions in this set. The one satisfying minimum of Equation (24) was chosen.

## 4. EXPERIMENTS

The technique suggested has been demonstrated on an artificial evoked potential signal. Evoked potentials (EPs) are types of bio-electrical signals that are generated by the central nervous system when human senses are excited by an external stimulus. In order to demonstrate the proposed algorithm a typical evoked potential signal was generated synthetically. The time-interval and sampling-rate were chosen to be 0.2 and 320 Hz respectively. The extreme value of the signal was normalized to be -1 since it was negative. This clean EP signal is sketched in Figure 2. The evoked potentials are usually contaminated by heavy noise or responses to other activities of the human body and are nearly impossible to detect from a single trial. To resemble this reality a normally distributed random noise with zero mean and 0.01 variance was added to the pure EP signal. The noisy EP is presented in Figure 2. The order of the FIR filter was set to be seven. The filter weights were obtained by using the exhaustive search algorithm given. Because of non-linearity and the number of equations is less than the number of variables, there is more than one solution of the systems of equations given in Equation (25), Equation (26). Firstly, hundred possible solutions of these equations were computed numerically by randomly changing initial values 100 times. Very likely, many solutions coincided. Next,  $L_1$ -norm of error expressed in Equation (24) was computed for each solution. The filter coefficients which achieve the lowest absolute error was chosen as the optimal



solution. Following filter specification, a new noisy evoked potential was generated and filtered by employing the structures given in Figure 3 and 4 to observe the effectiveness.

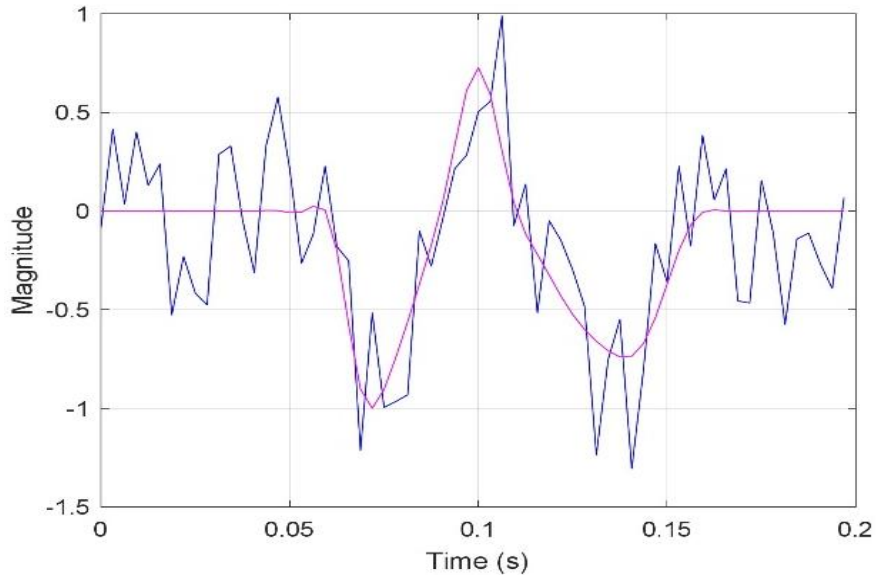


Figure 2. Noisy and clean synthetic evoked potential

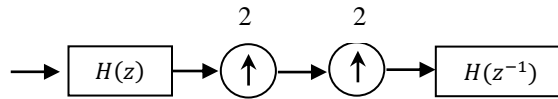


Figure 3. Experiment 1

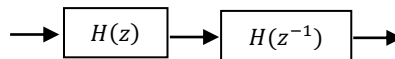


Figure 4. Experiment 2

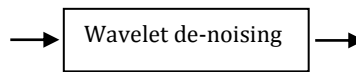


Figure 5. Experiment 3

The wavelet de-noising was also applied. The wavelet tree was a single two-band filter bank of optimum filter weights. The soft thresholding technique and universal threshold [11] were utilized for removing noise from the signal. For comparing performance of the best filter, Symlet, and Daubechies wavelet filters of length eight were also handled. The outcomes, in terms of  $L_1$ -norm of error, were finally reported.

## 5. RESULTS

After the best filter-coefficients were obtained a fresh noisy evoked potential was produced, and it was filtered by utilizing the structures in Figure 3. to evaluate performance of the approach. The arrangements in Figure 3, Figure 4 and Figure 5 are referred to as E1 (Experiment 1), E2 (Experiment 2) and E3 (Experiment 3)

respectively. And the optimal filters obtained for E1, E2, and E3 are denoted by F1 (Matched Filter 1), F2 (Matched Filter 2), and F3 (Matched Filter 3) accordingly.

**Table 1.** Best filter coefficients (C1, C2, ....C8) for the three experiments

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	0.23	0.18	0.42	0.41	-0.26	0.49	0.30	-0.38
F2	0.48	0.32	0.41	-0.36	-0.04	0.52	-0.15	0.22
F3	-0.19	0.09	-0.03	0.30	0.68	-0.21	0.24	0.52

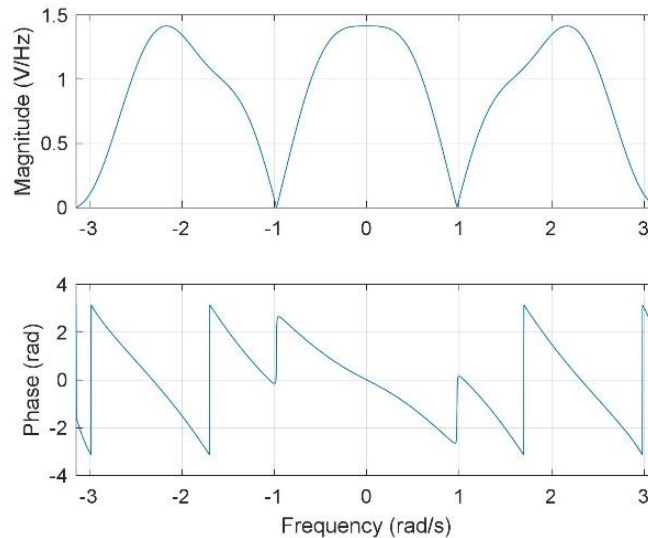
**Table 2.** Performance comparison

	F1	F2	F3	SYM	DB
E1	0.183	0.259	0.187	0.184	0.194
E2	0.367	0.299	0.362	0.458	0.458
E3	0.194	0.255	0.192	0.182	0.195

The wavelet de-noising method serves as a reference for the goodness of proposed approach. For the sake of clarity in tables, Symlet filter is

abbreviated as SYM and Daubechies filter as DB. The weights of filters which achieve minimum absolute error for each experiment are given in Table 1. Notice that the best filter coefficients change for each arrangement in Figure 3. The efficiencies of custom, Symlet and Daubechies filters, in terms of  $L_1$ -norm of error, are provided in Table 2. Figure 6 displays the magnitude and phase spectra of the best filter of the experiment in Figure 3. And Figure 7 illustrates outputs of the structure in Figure 3.

The similarity between the matched (optimal) filter and Symlet and Daubechies filters was measured by employing correlation coefficient and cosine similarity. These quantities are given in Table 3. The upper number is the correlation coefficient, and the bottom value is the cosine similarity in a cell of this Table. It is obvious that the best solutions obtained for three arrangements are quite different than Symlet and Daubechies filters.



**Figure 6.** Magnitude and phase spectra of the matched filter of experiment 1.

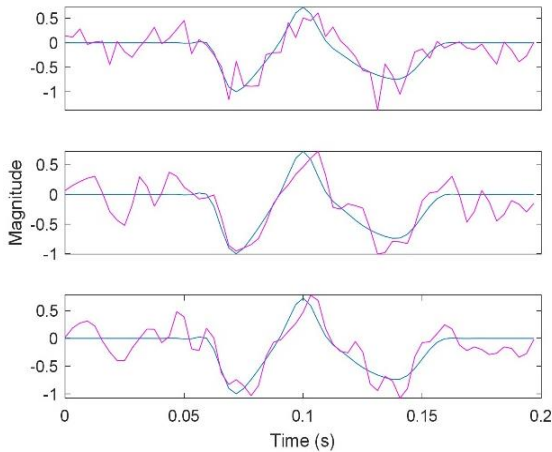
## 6. CONCLUSIONS

Filter banks and wavelet-based applications can be successfully used to solve noise suppression, and decomposition problems in signal processing area. In this study, a two-band quadrature-mirror orthogonal filter bank structure, consisting of

analyses and synthesis sections, was used to emphasize and extract one components of input signal; one branch of the filter bank was adopted to filter out a target signal. This was done by minimizing  $L_1$ -norm of error by utilizing brute-force search technique at the output of the filter bank system.

**Table 3.** Performance comparison

	F1	F2	F3
SYM	0.1636	-0.5861	0.3135
	0.3765	-0.1896	0.4851
DB	0.1828	0.1503	-0.2180
	0.3871	0.3627	0.0865



**Figure 7.** Filter outputs. The above, mid and bottom figures are outcomes of the matched, Symlet and Daubechies

The approach was run and tested for a typical, synthetically generated evoked potential signal arising in an electroencephalogram. The performances of designed filters were compared, in terms of  $L_1$ -norm of error, with two common wavelet filters: Symlet and Daubechies. The results show that the designed filters achieve lower inaccuracy than the common wavelet filters. Consequently, a filter specified by adopting the proposed approach can be used for signal decomposition or noise suppression as an alternative to common wavelet filters.

## 7. REFERENCES

1. Gurkan, H, Hanilci, A., 2020. ECG Based Biometric Identification Method Using QRS Images and Convolution Neural Network. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 26(2), 318-327.
2. Rangaraj, MR., 2015. Biomedical Signal Analysis. IEEE Press Series on Biomedical Engineering, 2<sup>nd</sup> edition. Wiley-IEEE Press.
3. Ergun, E., Aydemir, O., 2018. Improving Classification Accuracy of Motor Imagery EEG Signals Via Effective Epochs. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 24(5), 817-823.
4. Gilbert, S, Truong N., 1996. Wavelets and Filter Banks, 2<sup>nd</sup> edition. Wellesley-Cambridge Press.
5. Vaidyanathan, PP., 1990. Multirate Digital Filters, Filter Banks, Polyphase Networks, and Applications: A Tutorial. Proceedings of the IEEE 1990; 78(1), 56-93. doi: 10.1109/5.52200.
6. Kamislioglu B, Karaboga N., 2019. Investigation of the Performance of the Kaiser Hamming Window in Design of QMF Bank. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 25(2), 65-173.
7. Alyasseri, Z.A.A., Khader, A.T., Al-Betar, M.A., Abasi, A.K., Makhadmeh, S.N., 2019. EEG Signals Denoising Using Optimal Wavelet Transform Hybridized with Efficient Metaheuristic Methods. IEEE Access 2019; 8, 10584-10605. doi:10.1109/ACCESS.2019.2962658.
8. Li, W., 2018 Wavelets for Electrocardiogram: Overview and Taxonomy. IEEE Access 2018; 7:25627-25649. doi:10.1109/ACCESS.2018.2877793.
9. Zhang, J.H., Janschek, K., Bohme, J.F., Zeng, Y.J., 2004. Multi-resolution Dyadic Wavelet Denoising Approach for Extraction of Visual Evoked Potentials in the Brain. IEEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing 2004. 151(3), 180-186. doi: 10.1049/ip-vis:20040315.
10. Mintzer, F., 1982. On Half-band, Third-band, and Nth-band Fir Filters and Their Design. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing 1982. 30(5), 734-738. doi: 10.1109/TASSP.1982.1163950.
11. Boyd, S., Vandenberghe, L., 2004. Convex Optimization. USA: Cambridge University Press.
12. Donoho, DL., 1995. De-noising by Soft-thresholding. IEEE Transactions on Information Theory 1995. 41(3), 613-627. doi:13 10.1109/18.382009.

## Harbiye (Hatay) Şelaleler Bölgesindeki Şev Duraysızlıklarının Mühendislik Jeolojisi Açısından Değerlendirilmesi

Mehmet DUYAN<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-6795-2338  
Sedat TÜRKMEN<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0002-9567-5545

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 27.04.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: DUYAN, M., TÜRKMEN, S., (2021). Harbiye (Hatay) Şelaleler Bölgesindeki Şev Duraysızlıklarının Mühendislik Jeolojisi Açısından Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 1005-1018.

### Öz

Bu çalışmada, Hatay İli, Defne İlçesi Harbiye Mahallesi Şelaleler bölgesinde bulunan şevlerin duraylılığı değerlendirilmiş ve bölgenin heyelan riskinin azaltılması ile ilgili uygun çözümlerin ortaya konulması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında inceleme alanında sondajlar, presiyometre deneyleri ve inklinometre ölçümleri yapılmıştır. İnceleme alanında şev duraylılık problemlerinin bulunduğu bölgedeki litolojik birimler siltli kil ve kiltaşdır. Her birime ait kayma direnci parametreleri belirlenmiş ve Slide 3D yazılımı ile üç boyutlu şev stabilite analizi yapılmıştır. Şev stabilite analizlerinde, direk kesme deneyi, geri analiz ve RocData ile olmak üzere üç farklı yöntem kullanılarak elde edilen kayma dayanım parametreleri ayrı ayrı göz önünde bulundurulmuş ve bu üç farklı durum için güvenlik katsayısı hesaplamaları yapılmıştır. Güvenlik katsayısı hem statik durum hem de deprem durumu senaryoları için hesaplanmıştır. İlk senaryoda, direk kesme deneyinden elde edilen kiltaşına ait parametreler kullanılmıştır. İkinci senaryoda, RocData yazılımı ile elde edilen kiltaşına ait parametreler kullanılmıştır. Üçüncü senaryoda ise geri analiz ile elde edilen kiltaşına ait parametreler kullanılmıştır. Tüm senaryolar değerlendirilmiş ve geri analiz ile elde edilen kiltaşına ait kayma parametrelerinin bulunduğu üçüncü senaryonun gerçeğe en yakın koşulları yansıttığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Hatay, Heyelan, Geri analiz, Şev stabilitesi, RocData

### Assessment of Slope Instability on Waterfalls Region in terms of Engineering Geology (Harbiye, Hatay)

### Abstract

In this study, the stability of slopes located on Harbiye Waterfalls Region of Defne District (Hatay Province) was evaluated and suitable solutions are aimed to reveal. Within the scope of study drillings, pressure meter tests and inclinometer measurements were performed. With laboratory studies, the physical and mechanical properties of soil and rock units were determined. Lithological units, in the study area where slope stability problems exist, belong to lithological units are silty clay and claystone. There is

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Sedat TÜRKMEN, [sturkmen@cu.edu.tr](mailto:sturkmen@cu.edu.tr)

filling material on these units. Shear strength parameters of each unit were determined, and three-dimensional slope analysis was performed with Slide 3D software. The analyses were carried out in three different scenarios. Both the static state and the earthquake state were calculated for each scenario. In the first scenario, the claystone parameters obtained from the direct shear test were used. In the second scenario, the claystone parameters obtained from RocData software were used. In the third scenario, the claystone parameters obtained from the back analysis were used. All scenarios were evaluated, and it was determined, in the third scenario, the claystone parameters that are obtained from the back analysis reflect the actual conditions.

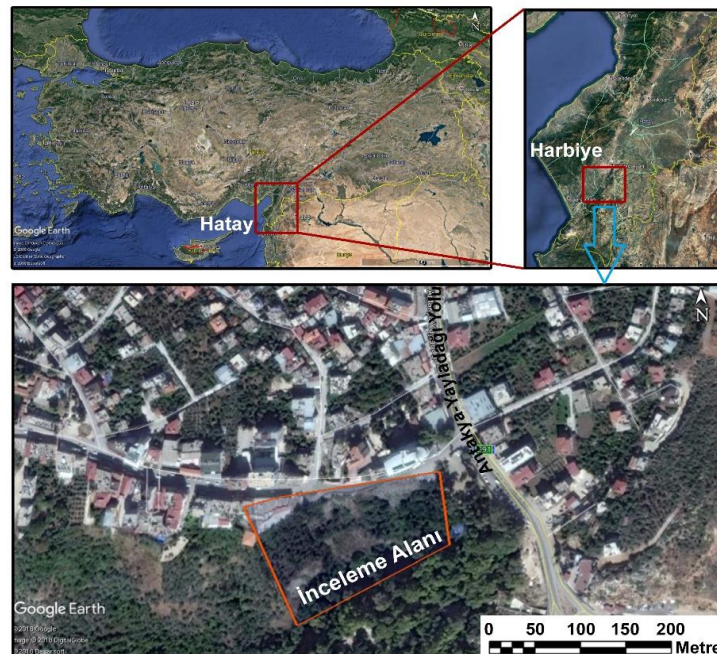
**Keywords:** Hatay, Land slide, Back analysis, Slope stability, RocData

## 1. GİRİŞ

Hatay İli Defne İlçesi Harbiye Mahallesi sınırları içerisinde bulunan, yaklaşık 3000 yıllık bir geçmişi olan, binlerce yıllık ağaçların bulunduğu Şelaleler bölgesi doğal güzellikleri Hatay'ın önde gelen turizm bölgelerinden biridir (Şekil 1). Şelale Deresinin aktığı vadinin yamaçları üzerinde konutlar, restoranlar, oteller ve çeşitli el sanat atölyeleri bulunmaktadır. Vadinin dik bir vadi olması, suyun varlığı ve yamaçlar üzerindeki yapı yükleriyle beraber heyelan potansiyelinin artması sonucunda bu bölgenin doğal tarihi yapısının bozulma riski doğmuş ve yer yer heyelanlar

gelişmiş, buna karşı birtakım önlemler alınmaya çalışılmış, ancak heyelan hareketi durdurulamamış ve yerleşim alanlarını tehdit etmeye başlamıştır.

Bu çalışmada; şelalelerin bulunduğu bölgenin genel jeolojik durumunun incelenmesi, duraysızlığa neden olan faktörlerin ve kayma mekanizmasının tespit edilmesi, geçmiş kaymalara benzer hareketlerin olup olmayacağını irdelenmesi, heyelanlara duyarlı alanların belirlenmesi, bölgenin mühendislik jeolojisinin yorumlanması ve şev stabilitesi ile ilgili alternatif önerilerin sunulması amaçlanmıştır [1].



Şekil 1. İnceleme alanı yer bulduru haritası (Google Earth'ten alınmıştır)



## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

#### 2.1.1. Harbiye Heyelanı

Çalışmanın konusunu oluşturan heyelan kilitli ağır ağırlıklı litolojilerden oluşan Tepehan Formasyonu içerisinde gerçekleşmiş olup kayan kütle dolgu, siltli kil ve kilitli birimlerinden oluşmaktadır. Arazi gözlemleri sonucunda, gerçekleşen kütle hareketinin tamamen dairesel bir kayma olmadığı gözlemlenmiş bu sebeple hesaplamalarda kayma şekli dairesel olmayan kayma hareketi olarak tanımlanmıştır (Şekil 2).

Şev kaymalarını önlemek amacıyla daha önce inşa edilen istinat duvarı yapılarının yeterli desteği sağlayamadığı görülmüştür. Yapılan gözlemlerde istinat duvarlarının inşa edildiği yerlerde bazı kayma hareketlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Kütle hareketinin genişlemesi yörede bulunan yapıları tehdit etmekte olup, bu nedenle bazı yapılar boşaltılmıştır (Şekil 3).



Şekil 2. Heyelan fotoğrafı (karşıdan görünüş)



Şekil 3. Bölgedeki kütle hareketinden kaynaklı, bina duvarındaki gözlemlenen deformasyon

#### 2.1.2. Çalışma Alanı Jeolojisi

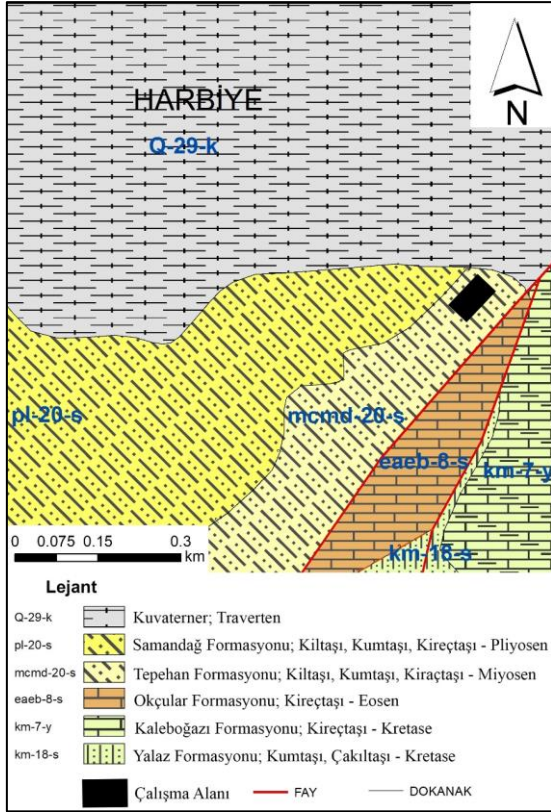
Çalışma alanında yürütülen çalışmalarda gözlemlenen litolojik birimler siltli kil, kilitli, kireçtaşı ve travertenlerden oluşmaktadır. Çalışma alanı ve çevresinin jeolojisini Kaleboğazı Formasyonu, Okçular Formasyonu, Tepehan Formasyonu ve güncel traverten ile Alüvyon oluşturmaktadır [2] (Şekil 4).

Siltli kil birimi; kahverengi renkli, katı-çok katı kıvamlı, yer yer kumlu, yüksek plastisitelidir. Kayma hareketlerinin gerçekleştiği şevlerde ve sondajların yapıldığı bölgelerde gözlemlenen bu litolojik birim Tepehan Formasyonuna aittir. İnceleme alanında bazı derinliklerde bu birimin içinde marn seviyeleri gözlemlenmiş fakat litolojiye bakıldığında çoğunlukla yüzeye yakın kısımlarda ayrışmaya bağlı olarak siltli kil biriminin, derinlerde ise kilitli-marn yer yer kumtaşının hakim olduğu belirlenmiştir.

Kilitli birimi; grimsi mavi renkli, ayrışmamış-az ayrışmış, bozunmamış-az bozunmuş, kırıklı-çok çatlaklı, çok zayıf dayanımlıdır. Kayma hareketlerini gerçekleştiği şevlerde ve sondajların yapıldığı bölgelerde gözlemlenen bu litolojik birim Tepehan Formasyonuna aittir. Arazi gözlemlerinde bu birime ait tabakalar gözlemlenmemiş bu sebeple eğim doğrultu ölçümü yapılamamıştır. Ancak sondaj derinliklerinin korelasyonu sonucunda bu birimin birkaç derece eğimli çoğunlukla yataya yakın tabakalı olduğu görülmektedir.

Çalışma alanı çevresinde izlenen diğer birim, kireçtaşı; grimsi-beyaz renkli, orta derecede ayrışmış-çok ayrışmış, az bozunmuş, kırıklı-çok çatlaklı, yüksek dayanımlıdır. Bölgede hem Kaleboğazı hem de Okçular Formasyonuna ait kireçtaşları bulunmaktadır [2].

Traverten birimi ise; Harbiye dolaylarında yaklaşık 5 km<sup>2</sup>'lik bir alanda yayılım gösterir. Genellikle açık kahverengimsi krem renkte, çok boşluklu, bol bitki kalıntısı içerir. Kuvaterner seri içerisinde yer almaktadır.



Şekil 4. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası ([2]'den yararlanılmıştır)



Şekil 5. Tepahan Formasyonunun yakından görünümü

## 2.2. Metot

Yürütülen bu çalışma; literatür çalışmaları, arazi çalışmaları, laboratuvar çalışmaları ve büro çalışmaları olmak üzere dört aşamada

gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında; Akademi Jeolojik Jeoteknik Etüt Proje Mühendislik Müşavirlik İnşaat Sanayi Ticaret Limited Şirketi ve Gür Mühendislik Jeoteknik Sondaj Harita İnşaat Makine Taahhüt Sanayi Ticaret Limited Şirketi tarafından jeoteknik amaçla yapılan sondajlardan ve inklinometre okumalarından yararlanılmıştır [3].

### 2.2.1. Literatür Çalışmaları

Arazi çalışması öncesinde çalışma alanı ve yakın çevresiyle ilgili literatür araştırması yapılmış olup çalışma alanı ve yakın çevresiyle ilgili yapılan tezler ve makaleler incelenmiş, bölgede yapılmış arazi ve laboratuvar çalışmaları elde edilmiştir. Çalışma alanı ve yakın çevresini içeren jeoloji haritalarından yararlanılarak bölge hakkında ön bilgiler edinilmiştir. Arazi ve büro çalışmalarında kullanılmak üzere inceleme alanının 1/2000 ölçekli topoğrafik sayısal haritası Hatay Büyükşehir Belediyesi'nden temin edilmiştir.

### 2.2.2. Arazi Çalışmaları

Saha çalışmaları kapsamında inceleme alanındaki zeminlerin ve kayaların mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Jeolojik ve Jeoteknik Etüt Raporu kapsamında 45-50 m arasında değişen 8 adet sondaj kuyusu, bu çalışma kapsamında ise 12 m derinliğinde 1 adet presiyometre kuyusu açılmıştır. Presiyometre çalışmalarında 4 farklı seviyede ölçümler yapılmıştır. Ayrıca 8 adet sondaj kuyusundan 6 tanesi inklinometre çalışmalarında kullanılmıştır.

### 2.2.3. Sondajlar

İnceleme alanında yer alan zemin ve kaya birimlerinin bileşimlerini, kalınlıklarını, litolojik, fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek ve yeraltı suyu durumuyla ilgili bilgi edinmek amacıyla şev tepesinde sondaj kuyuları açılmıştır (Şekil 6). Sondaj kuyularının lokasyon planı Şekil 7'de sunulmuştur. Şev yamacının kayma tehlikesi yüksek olduğundan ve kayan kütleyle ulaşımın sarp arazi koşulları yüzünden elverişli olmaması sebebiyle kayan kütle sondajlarda kesilememiştir.





Şekil 6. Arazide yapılan sondaj çalışmaları



Şekil 7. Sondaj kuyularının lokasyon planı

#### 2.2.4. Laboratuvar Çalışmaları

Sondaj çalışmalarından elde edilen zemin ve kaya numuneleri Akademi Jeolojik Jeoteknik Etüd Proje Müh. İnş. San. Tic. Ltd. Şti.'ye ait laboratuvara gönderilmiştir. Laboratuvar çalışmalarıyla zemin ve kaya birimlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sondaj çalışmaları ile elde edilen zemin ve kaya numunelerinden litolojik birimleri en uygun şekilde ayıklanmış ve bunların üzerinde uygun deneyler yapılmıştır. Bu kapsamda 58 adet karot 13 adet SPT ve 2 adet örselenmemiş numune laboratuvar deneylerine tabi tutulmuştur.

#### 2.2.5. Büro Çalışmaları

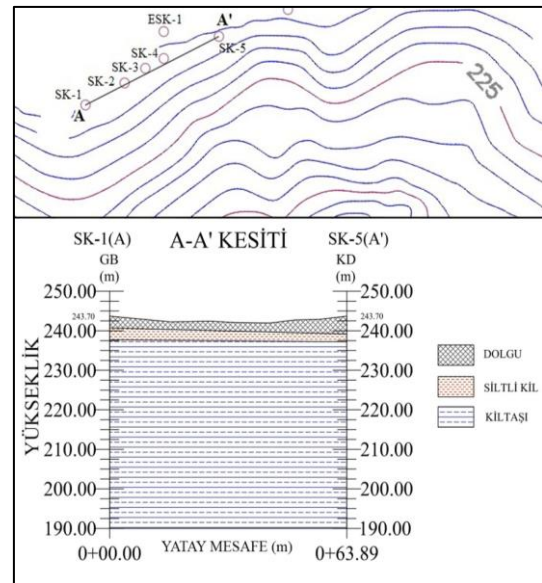
Büro çalışmaları kapsamında şev analizinde kullanılacak parametrelerin laboratuvar sonuçları, arazi gözlemleri ve RocData (versiyon 2017) bilgisayar yazılımı kullanılarak belirlenmiş olup üç boyutlu şev stabilize analizlerinde kullanılmıştır. Analiz çalışmaları Slide 2D (versiyon 2018) ve Slide 3D (versiyon 2017) bilgisayar yazılımları ile yapılmıştır. Geri analiz yöntemi ile şev ile ilgili

parametreler elde edilmiştir. Ayrıca arazi çalışmalarından elde edilen veriler değerlendirilmiş olup arazide alınan inklinometre ölçümleri ile şevlerin hareket durumu incelenmiştir.

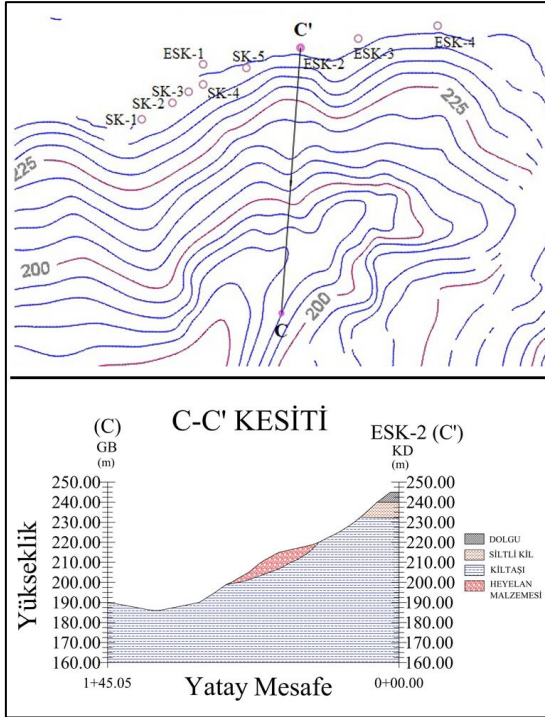
### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

#### 3.1. İnceleme Alanı Jeolojisi

Şev analizi yapılacak bölgenin yeraltı jeolojisi incelendiğinde şev hesaplamalarına dahil olan birimlerin kil ağırlıklı olduğu (siltli kil, kıltaşı gibi birimler) görülmektedir. Ayrıca şevde 6-7 metre aralığındaki derinliklerde yeraltı suyu bulunması, kıltaşı birimi ve altındaki tüm birimlerin suya doygun olduğunu göstermektedir. Sondaj çalışmalarından yola çıkılarak, çalışma alanı ve çevresinin yeraltı jeolojisini temsil eden jeolojik kesitler hazırlanmıştır. Sondaj kuyuları arası kesit Şekil 8'de şev kesiti Şekil 9'da sunulmuştur. İnceleme alanında 0,3 ile 4,5 metre arasında değişen kalınlıklarda dolgu malzemesi bulunmaktadır. İnceleme alanında gözlemlenen siltli kil biriminin kalınlığı 1,2-6,0 metre arasında değişmektedir. Kıltaşı birimi ise tüm kuyularda siltli kil biriminden sonra gözlemlenmiş ve kuyu sonlarına kadar devamlılık göstermiştir.



Şekil 8. Kuyular arası jeolojik kesit



Şekil 9. Kayma yönü boyunca alınan jeolojik kesit

### 3.2. İnklinometre Ölçümleri

Arazide yapılmış olan inklinometre çalışmaları sonucunda ESK-4 kuyusunda ilk 4 metrelik derinlikte 0,6 mm'ye kadar bir deplasman ölçülmüştür. En yüksek ölçüm SK-2 kuyusunda yapılmış olup 45 m derinlikte deplasman miktarı 10 mm olarak ölçülmüştür. İnklinometre ölçümleri değerlendirildiğinde bölgede hareketin halen devam ettiği anlaşılmaktadır. Ancak derinlerde meydana gelen bu hareket sadece bir kuyuda ölçüldüğü için derinlerde mevcut olabilecek bir kayma yüzeyinin varlığı hakkında destekleyici bilgilere ulaşılamamıştır.

### 3.3. Şev Analizinde Kullanılacak Parametrelerin Seçimi

Kısa dönem duraylılık analizlerinde kullanılacak parametreler drenajsız dayanım parametreleri olup uzun dönem duraylılık analizlerinde kullanılacak parametreler ise efektif dayanım parametreleridir. Bu çalışmaya konu olan inceleme alanında analiz

edilecek şevin tepesine ani bir yüklemeye yapılmayacağından zemin içerisinde bulunan su zamanla drene olmaktadır. Bu sebeple uzun dönem duraylılık analizleri yapılması ve suya doygun birimlere ait şev analizinde kullanılacak parametrelerin efektif parametreler olması gerekmektedir.

Eğer bir şevde kayma gerçekleşmiş ise o şev ile ilgili rezidüel dayanım parametreleri kullanılır. Rezidüel dayanım parametreleri hem direk kesme deneyi hem de geriye dönük şev analiziyle tespit edilebilmektedir [4]. Ayrıca RocData yazılımı ile parametreler elde edilmiş ve bu parametrelerle de analizler yapılmıştır.

RocData ile kiltaşına ait kohezyon ve içsel sürtünme açısı elde edebilmek için güncel numunelerden 20 adet tek eksenli basınç dayanımı değerinin ortalaması alınarak RocData için  $q_{un}$  değeri elde edilmiş ve 58 adet doğal birim hacim ağırlık değerinin ortalaması alınmıştır. Böylece girdi parametreleri  $q_{un} = 3,3$  MPa ve  $\gamma_n = 17,9$  kN/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Hoek Brown sınıflandırması için jeolojik dayanım indeksi değeri kullanılmış ve litolojik birim RocData yazılımından kiltaş olarak seçilmiştir (Çizelge 1).

Geri analiz hesaplamalarında tüm litolojik birimler için Mohr-Coulomb yenilme zarfı tanımlanmıştır. Kiltaşının rezidüel dayanım parametrelerine ulaşabilmek için hedef birim olarak kiltaş birimi seçilmiş diğer birimlerin değerleri sabit bırakılmıştır. Geri analizde hesaplanacak kohezyon değeri aralığı 0-80 kPa ve içsel sürtünme açısı değeri aralığı 0-60° olarak seçilmiş ve parametre hesabı için probabilistik (olasılıksal) yöntem kullanılmıştır. Kayma türü dairesel olmayan (non-circular) olarak seçilmiş ve kayma yüzeyi adedi=1 olarak seçilmiştir. Elde edilen dağılım grafiğinde, geri analiz için tanımlanan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değeri aralığında 5000 adet parametre çifti hesaplanmış ve bunların arasından güvenlik katsayısı yaklaşık olarak 1'e eşit olan 96 adet parametre çifti belirlenmiştir (Şekil 10). Geri analizle elde edilen kohezyon-içsel sürtünme açısı grafiğinden regresyon çizgisine yakın olan bir değer çifti seçilmiştir (Çizelge 2).



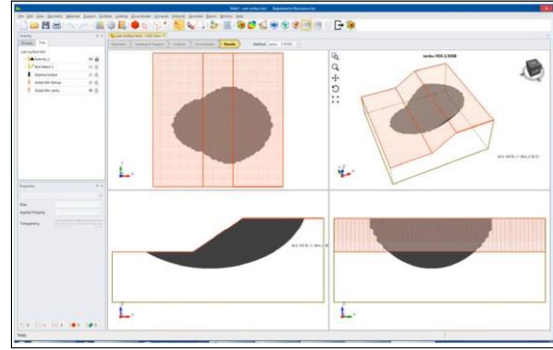
### 3.4. Şevin Kayma Mekanizması ve Uygun Analiz Yöntemi Seçimi

Bu çalışmada Slide şev analiz yazılımlarında en doğru sonuçları veren yöntemlerden biri olan Spencer yöntemi [7,8] kullanılmıştır. İnceleme alanında, kayan kütle ve civarında yapılan gözlemler sonucunda gerçekleşen kaymaların hem zemin hem kaya türü birimlerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kayma düzleminin zeminlerde dairesel şekilde, kaya biriminde ise dairesel olmayan bir şekilde devam ettiği gözlemlenmiştir. Şevdeki hareket kompleks kayma şeklinde olduğu için ve pratik olması açısından hızlı bir şekilde çözümler yapılabilmesi için Spencer yönteminin uygun olacağı düşünülmüştür.

#### 3.4.1. Üç Boyutlu Şev Stabilite Analizi

Slide 3D, limit denge yöntemi kullanarak üç boyutlu şev stabilite analizi yapan bir yazılımdır. Çalışmada "Slide 3D" olarak adlandırılan yazılım kullanılmıştır. Slide 2D'de analizlerde kullanılan düzlemsel kesitlerde sadece iki boyutlu modelleme ile analiz yapılabilirken Slide 3D ile üç boyutlu olarak kompleks bir şev geometrisi kolaylıkla analiz edilebilmektedir. Ayrıca Slide 3D yazılımının güçlü geometri modelleme ve veri yorumlama özelliği sayesinde kullanıcı dostu olup hızlı bir şekilde analizler yapılabilir. Slide 2D yazılımında kayma yüzeyinin stabilite analizlerinde kullanılabilen Bishop, Janbu, Spencer, Sarma, Morgenstern-Price (GLE) [8, 9] vb. gibi yaygın limit denge metotları da Slide 3D yazılımında kullanılabilir. Kayan kütle çevresi arasındaki makaslama direnci iki boyutlu analizlerde ihmal edilmesine rağmen üç boyutlu analizlerde makaslama direnci hesaba katılmaktadır. Slide 3D yazılımı aynı Slide 2D gibi limit denge analiz yöntemlerini kullandığı için kayan kütleler dilimler halinde çözümlenir. Slide 3D arazi modeli üzerinde litolojik birimlerin oluşturulması için yazılıma sondaj kuyularının yerleri ve birimlerin kalınlıkları girilerek korelasyon yapılması yeterlidir. Slide 3D yazılımında analiz yapılan bölgenin dört ayrı pencerede farklı açılardan görünümü ekranda aynı anda görüntülenir (Şekil 11). Böylece farklı açılardan kayan kütle ve şev çevresi rahatlıkla

incelenebilmektedir. Ayrıca modellenen şevler her açıdan kolaylıkla görüntülenebildiğinden destek sistemleri ve yapı yükleri rahatlıkla uygulanabilmektedir.



Şekil 11. Slide 3D yazılımından örnek bir ekran görüntüsü

Şev stabilite analizlerinde şevin durumu güvenlik katsayısı (GK)'nın 1'den büyük, 1'den küçük veya 1'e eşit olmasına göre değerlendirilmiştir. Güvenlik katsayısı 1'den büyük olduğu durumlarda şev duraylı olarak değerlendirilmiştir.

Şev analizinde kullanılan parametreler farklı yöntemlerle elde edilmiştir. Bu parametreler direk kesme deneyi, geri analiz ve RocData yazılımı ile üç farklı şekillerde elde edilmiştir. Parametrelerin elde edilme şekillerine göre farklı senaryolar üzerinde durulmuştur. Her bir senaryoda kilitaşına ait makaslama dayanım parametreleri farklı değerler almaktadır. Şev duraylılığının tespitinde önce her bir senaryo için statik durum ele alınarak analiz yapılmış daha sonra her bir senaryonun deprem durumunda göstereceği davranış hesaba katılarak analiz yapılmıştır. Kilitaşın suya doygun olduğu kabul edilerek 3 adet statik durum analizi ve 3 adet deprem durumu analizi olmak üzere toplam 6 adet analiz yapılmıştır. Oluşturulan üç boyutlu arazi modelinde çalışma alanı civarında veri toplanan ve problemlili olan bölge sınırlandırılmış olup analizler bu bölgeye yoğunlaştırılmıştır. Elde edilen güvenlik katsayıları Çizelge 3'te verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre şev stabilitesi ile ilgili ortaya konan üç farklı senaryo değerlendirildiğinde



direk kesme deney sonuçlarının kullanıldığı 1. senaryoda elde edilen sonuçların araziye yansıtılmayacak kadar düşük olduğu görülmektedir. Direk kesme deneyinde yalnızca bir numuneye dayanarak analiz yapıldığından elde edilen sonuçların güvenilirliği düşüktür. 2. senaryoda ampirik yöntemleri kullanan RocData yazılımı ile elde edilen parametreler ise tüm diğer senaryolardan daha yüksek güvenlik katsayılarının hesaplanmasına sebep olmuştur. 3. senaryoda geri analiz ile elde edilen parametreler ile hesaplamalar

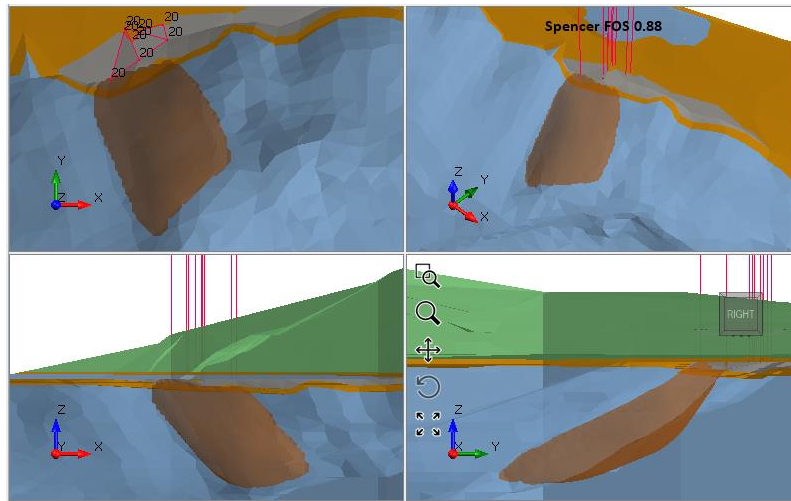
yapılmış ve 1. senaryo ile 2. senaryo değerlerinin arasında değerler elde edilmiştir. Geri analiz yönteminin kullanıldığı senaryoda elde edilen sonuçlar diğer senaryolarla elde edilen değerlerin arasında değerler olduğundan ayrıca geri analizle elde edilen parametrelerin daha önce kayma hareketi gerçekleşen bir şev için kullanılmasının daha doğru olacağından 3. senaryo iyileştirmeler ve öneriler için baz alınmıştır. Araziye gerçekleşecek kaymaların 3. senaryodaki gibi olacağı kabul edilmiştir.

**Çizelge 3.** Üç boyutlu şev analizi sonuçları

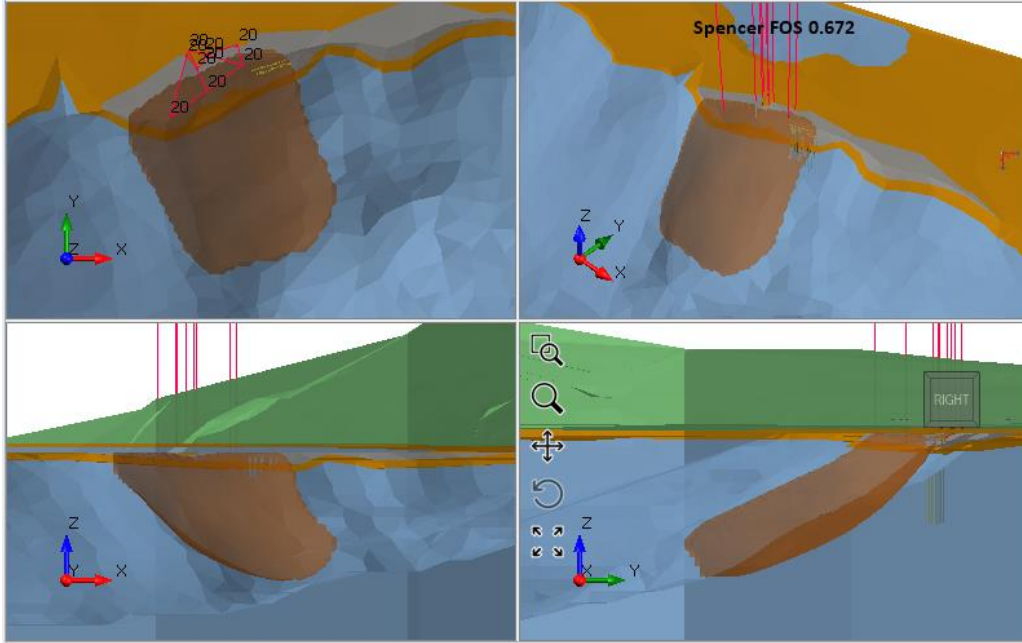
	Statik durum için güvenlik katsayıları	Deprem durumu için güvenlik katsayıları
Direk kesme deneyi	0,45	0,37
RocData yazılımı	1,28	1,00
Geri analiz	0,88	0,67

3. senaryoda; Slide3D yazılımına girilen parametreler Çizelge 2’de verilmiştir. İlk önce statik durum analizi yapılmış daha sonra da sismik yük katsayısı eklenerek deprem koşullu analiz yapılmıştır. Statik durumda en düşük GK=0,88 olarak hesaplanmış deprem durumunda ise en düşük GK =0,672 olarak hesaplanmıştır. Her iki durumda da elde edilen güvenlik katsayılarının 1’den küçük olması nedeniyle üçüncü senaryoda

yamacın duraylı olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Statik durumda beklenen kaymanın şeve yakın olan yapının önünden itibaren gerçekleşeceği görülmektedir (Şekil 12). Deprem durumunda ise beklenen kaymanın şeve yakın olan yapının hemen hemen yarısını içine aldığı ve şev tepesinde bulunan mevcut fore kazıklar sayesinde genişliğinin sınırlandığı görülmektedir (Şekil 13).



**Şekil 12.** Geri analizden elde edilen girdi parametreleri kullanılıp statik durumdaki kayma hareketi sonuçlarını gösteren Slide3D ile oluşturulmuş üç boyutlu model (senaryo 3). Her bir model farklı perspektiflerden potansiyel kayma alanını (koyu kahverengi kütle) göstermektedir



Şekil 13. Geri analizden elde edilen girdi parametreleri kullanılıp deprem durumundaki kayma hareketi sonuçlarını gösteren Slide3D ile oluşturulmuş üç boyutlu model (senaryo 3). Her bir model farklı perspektiflerden potansiyel kayma alanını (koyu kahverengi kütle) göstermektedir

### 3.5. Şev İyileştirme Yöntemleri

Çalışma kapsamında iyileştirme yöntemi olarak fore kazıklar önerilmiştir. Slide3D yazılımı kullanılarak üç boyutlu analizlerle farklı boyutlarda ve farklı sayıda fore kazık uygulamaları analiz edilmiş ve en uygun ve ekonomik tasarım değerlendirilmiştir. Elde edilen analiz sonucunda önerilen tasarımda fore kazıklar 25 ile 35 metre aralığında değişen uzunluklara sahip toplamda 175 adettir. Uygulanacak fore kazıklar 3 sıra halinde denenmiş ve şevin farklı noktalarında konumlandırılmıştır (Şekil 14). Bu senaryoda ilk sıra şev tepesinde 35 metre uzunluğunda 30 adet betonarme fore kazık varsayılmıştır. İkinci sıra yaklaşık şev ortasında olup 30 metre uzunluğunda 60 adet betonarme fore kazıktan oluşmaktadır. Üçüncü sıra şev topuğuna yakın olup 25 metre uzunluğunda 85 adet betonarme fore kazıktan oluşmaktadır. Tüm fore kazıkların çapı 140 cm ve merkezden merkeze kazık aralıkları 160 cm ve kesme dayanımları 2500 kN olarak alınmıştır. İyileştirme çalışmaları kapsamında onlarca senaryo

denenmiş olup en ideal sonuçların 3 sıra fore kazık çalışmasıyla elde edildiği görülmüştür. Ayrıca şevin tepesinde eski kazıklar gibi iki sıra fore kazık uygulanmaya çalışılmış ancak yapı yüklerinden dolayı eklenen bu yeni iki sıra fore kazık verimli olmamıştır (Şekil 15, 16).

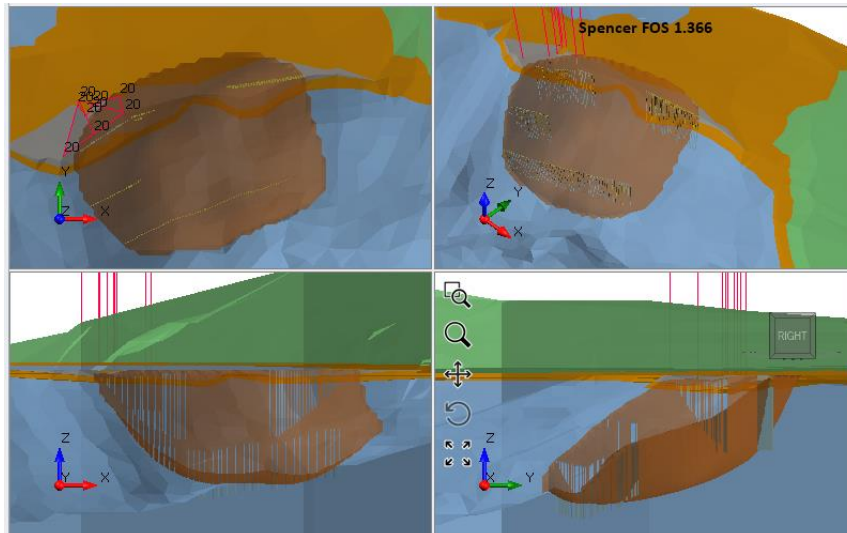
Denenen bu tasarımda statik durumda en düşük GK değeri 0,880'den 1,366'ya yükselmiştir. Deprem durumunda ise en düşük GK 0,672'den 1,064'e yükselmiştir (Çizelge 4). Böylece iyileştirme sonucunda statik durumda önceden duraylı olmayan şev duraylı hale getirilmiştir. Limit denge prensibine göre deprem durumundaki güvenlik katsayısı 1'den büyük olduğu için şevin duraylı olduğu tanımlanmıştır. Ancak deprem koşulunda elde edilen bu güvenlik katsayısı bire yakın olduğu için deprem durumunda şevin durumu kritiktir. Çalışma kapsamında yapılan iyileştirme çalışması mutlak bir çözüm değildir alternatif iyileştirmelerle ve şev üzerindeki yapı yüklerinin azaltılmasıyla bu güvenlik katsayısı artırılabilir.



Şekil 14. Şevin üç farklı bölgesine (tepe, orta ve topuğa yakın bölgelere) uygulanacak şekilde önerilen fore kazıkların (sarı renkli hatlar) arazideki konumları

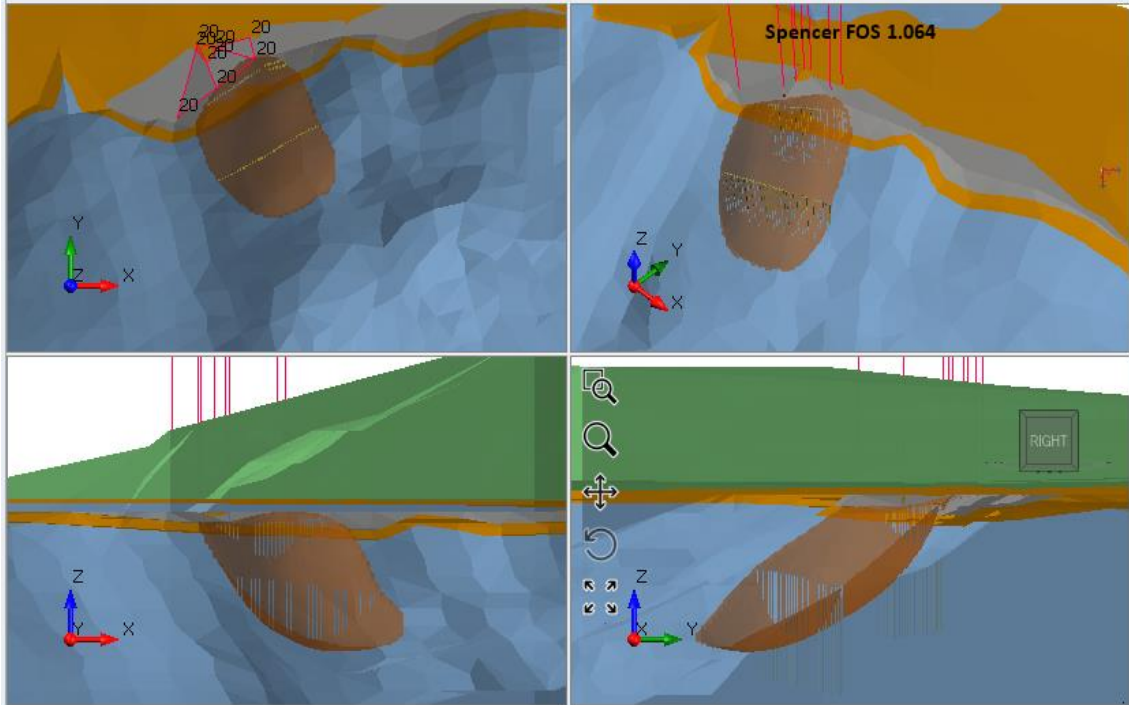
Çizelge 4. İyileştirme sonucu elde edilen güvenlik katsayıları

Önerilen iyileştirme	Güvenlik sayısı	
	Statik durum	Deprem durumu
Pasif kazık ile iyileştirme	1,37	1,06



Şekil 15. Geri analizden elde edilen girdi parametreleri kullanılarak oluşturulmuş statik durumdaki kayma hareketini gösteren modelin fore kazık iyileştirmesi sonrasındaki durumunu gösteren Slide3D ile oluşturulmuş üç boyutlu şev modeli (senaryo 3)





Şekil 16. Geri analizden elde edilen girdi parametreleri kullanılarak oluşturulmuş deprem durumundaki kayma hareketini gösteren modelin fore kazık iyileştirmesi sonrasındaki durumunu gösteren Slide3D ile oluşturulmuş üç boyutlu şev modeli (senaryo 3)

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada Hatay ili Defne ilçesi Harbiye mahallesinde yer alan Şelaleler bölgesindeki şevlerin durumu mühendislik jeolojisi açısından incelenmiş, şevlerin stabilite problemleri araştırılmış, bilgisayar yazılımları (Slide 2018 ve Slide3 2017) ile çözümlenmeler yapılmış ve elde edilen veriler yardımıyla önerilerde bulunulmuştur.

Saha çalışmaları kapsamında inceleme alanındaki zeminlerin ve kayaların mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Jeolojik ve Jeoteknik Etüt Raporu kapsamında [3], 45-50 m arasında değişen 8 adet sondaj kuyusu, bu çalışma kapsamında ise 12 m derinliğinde 1 adet presiyometre kuyusu açılmıştır. Presiyometre çalışmalarında 4 farklı seviyede ölçümler yapılmıştır. Ayrıca 8 adet sondaj kuyusundan 6 tanesi inklinometre çalışmalarında kullanılmıştır.

İnceleme alanında yapılan sondajlarda 0,30-4,5m kalınlığında dolgu malzeme, 1,2-6,0m kalınlığında siltli kil ve bu birimleri takiben kuyu sonlarına kadar devamlılık gösteren kiltası birimi gözlemlenmiştir. Sondajlarda gözlemlenen litolojik birimler Tepehan Formasyonu içerisinde yer almaktadır. Ayrıca inceleme alanı ve civarında yapılan jeolojik çalışmalarda Kaleboğazı Formasyonuna ait kireçtaşı birimi ile Okçular Formasyonuna ait kireçtaşı birimine ve Kuvaterner yaşlı Traverten birimine rastlanılmıştır.

Arazide yapılmış olan inklinometre çalışmaları sonucunda ESK-4 kuyusunda ilk 4 metrelik derinlikte 0,6 mm'ye kadar bir deplasman ölçülmüştür. En yüksek ölçüm SK-2 kuyusunda yapılmış olup 45 m derinlikte deplasman miktarı 10 mm olarak ölçülmüştür. Inklinometre ölçümleri değerlendirildiğinde bölgede hareketin halen devam ettiği anlaşılmaktadır. Ancak derinlerde

meydana gelen bu hareket sadece bir kuyuda ölçüldüğü için derinlerde mevcut olabilecek bir kayma yüzeyinin varlığı hakkında destekleyici bilgilere ulaşılamamıştır.

Arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen şev parametreleri Dolgu malzeme için  $C=118,9$  kPa,  $\phi=58^\circ$ ; siltli kil için  $C=62,9$  kPa,  $\phi=7,5^\circ$  şeklindedir. Geri analizlerden elde edilen ve şev analizinde kullanılacak kıltaşı parametreleri ise  $C_{gerianaliz}=43$  kPa,  $\phi_{gerianaliz}=35^\circ$  şeklindedir. Kıltaşı birimin tamamen suya doygun olduğu kabul edilmiş ve boşluk suyu basıncı dolgu için  $R_u=0$ , siltli kil için  $R_u=0$  ve Kıltaşı için  $R_u=0,54$  olarak hesaplanmıştır. Birimlere ait ortalama doğal birim hacim ağırlık değerleri kullanılmış olup bu değerler dolgu için  $\gamma_n=18$  kN/m<sup>3</sup>, siltli kil için  $\gamma_n=17,8$  kN/m<sup>3</sup> ve kıltaşı için  $\gamma_n=17,9$  kN/m<sup>3</sup> şeklindedir.

Stabilite analizleri, şev parametrelerinin elde edilme yöntemlerine göre 3 farklı senaryoda hem statik koşullarda hem de depremlilik koşullarda yapılmıştır. 1. senaryoda arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen parametreler, 2. senaryoda RocData ile elde edilen parametreler ve 3. senaryoda ise geri analizlerden elde edilen parametreler kullanılmıştır. Tüm analizlerde Spencer Yöntemi kullanılarak dairesel olmayan kayma yüzeyleri üzerinden GK (güvenlik katsayısı) hesaplamaları yapılmıştır. 1. Senaryoda statik durumda en düşük GK = 0,453 olarak hesaplanmış deprem durumunda ise en düşük GK= 0,339 olarak hesaplanmış olup GK <1 olduğu için duraysızlık söz konusudur. 2. senaryoda statik durumda en düşük GK=1,284 olarak hesaplanmış deprem durumunda ise en düşük GK = 1,005 olarak hesaplanmış olup statik durumda GK<1 olduğu için duraysızlık deprem durumunda GK=1 olduğu için limit denge söz konusudur. 3. senaryoda statik durumda en düşük GK=0,880 olarak hesaplanmış deprem durumunda ise en düşük GK=0,672 olarak hesaplanmış olup GK<1 olduğu için duraysızlık söz konusudur. RocData yazılımı ampirik eşitlikler ile hesaplamalar yapmakta olup verdiği değerler yüksek çıkmıştır. Bir adet direk kesme deneyi kullanılarak yapılan analizde deney sayısının az olması sebebiyle sonuçların güvenilirliği düşüktür. Geri analiz

yönteminin kullanıldığı senaryoda elde edilen sonuçlar diğer senaryolarla elde edilen değerlerin arasında değerler olduğundan ayrıca geri analizde elde edilen parametrelerin daha önce kayma hareketi gerçekleşen bir şev için kullanılması daha doğru olacağından 3. senaryo, iyileştirmeler ve öneriler için baz alınmıştır. Araziye gerçekleştirilecek kaymaların 3. senaryodaki gibi olacağı kabul edilmiştir.

Şev iyileştirme yöntemlerinden pasif kazık yöntemi kullanılmıştır. Fore kazıklar 3 sıra halinde önerilmiş ve şevin farklı noktalarında konumlandırılmıştır. İlk sıra şev tepesinde olup 35 metre uzunluğunda 30 adet betonarme fore kazıktan oluşmaktadır. İkinci sıra yaklaşık şev ortasında olup 30 metre uzunluğunda 60 adet betonarme fore kazıktan oluşmaktadır. Üçüncü sıra şev topuğuna yakın olup 25 metre uzunluğunda 85 adet betonarme fore kazıktan oluşmaktadır. Fore kazıklar 140 cm çapta ve merkezden merkeze 160 cm aralıklı olup gibi kazıkların kesme dayanımları 2500 kN olarak alınmıştır. İyileştirme sonrası statik durumda en düşük GK değeri 0,880'den 1,366'ya yükselmiş deprem durumunda ise en düşük GK 0,672'den 1,064'e yükselmiştir. İyileştirme sonrası GK>1 değerleri elde edildiğinden duraysız olan şevde stabilite sağlanmıştır. Limit denge prensibine göre deprem durumundaki güvenlik katsayısı 1'den büyük olduğu için şevin duraylı olduğu tanımlanmıştır. Ancak deprem koşulunda elde edilen bu güvenlik katsayısı bire yakın olduğu için deprem durumunda şevin durumu kritiktir. Makale kapsamında yapılan iyileştirme çalışması mutlak bir çözüm olmayıp alternatif iyileştirmelerle ve şev üzerindeki yapı yüklerinin azaltılmasıyla bu güvenlik katsayısı artırılabilir. İnceleme alanındaki problemlilik şevlerin jeolojisi incelendiğinde killi birimlerin hakim olduğu görülmektedir. Bu killi birimlerin bünyesindeki suyun drene olma süresi uzun olduğundan boşluk suyu basıncı stabilite için problemliler yaratmaktadır. İnceleme alanının şelaleler bölgesinde olması sebebiyle devamlı su varlığından kaynaklı problemlilerin mevcut olacağından şevler üzerinden drenaj ağlarının oluşturulması önerilmektedir.

## **5. KATKI BELİRTME**

ASCE, New York, 1, 1-26

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi Tarafından desteklenmiştir (FLY-2018-10502 nolu Proje kapsamında).

## **6. KAYNAKLAR**

1. Duyan, M., 2019. Harbiye (Hatay) Şelaleler Bölgesindeki Şev Duraysızlıklarının Mühendislik Jeolojisi Açısından Değerlendirilmesi. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 203.
2. Selçuk, H., 1985. Kızıldağ–Keldağ–Hatay Dolayının Jeolojisi ve Jeodinamik Evrimi. MTA Rapor No: 7787, Ankara
3. Tüfenkçi, O., 2015. Hatay Büyükşehir Belediyesi Hatay İli Defne İlçesi Harbiye Mahallesi Ürgen Caddesinde Meydana Gelen Heyelanın Zemin İncelemesi Hizmet Alım İşi Jeolojik Jeoteknik Etüt Raporu. Akademi Jeolojik Jeoteknik Etüd Proje Müh. Müş. İnş. San. Tic. Ltd. Şti., Ankara, 75.
4. Duncan, J.M., Wright, S.G., 2005. Soil Strength and Slope Stability. John Wiley & Sons Inc.
5. Briaud, J.L., Lytton, R.L., Hung, J.T., 1983. Obtaining Moduli From Cyclic Pressuremeter Tests. Journal of Geotechnical Engineering, 109, 657–665.
6. Baquelin, F., Jezequel, J.F., Shields, D.H., 1978. The Pressuremeter and Foundation Engineering. Trans Tech Publications, Clausthal-zellerfeld, Germany, 617.
7. Spencer, E., 1967. A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-slice Forces. Geotechnique, 17(1), 11–26.
8. Spencer, E., 1973. Thrust Line Criterion in Embankment Stability Analysis. Geotechnique, 23(1), 85–100.
9. Bishop, W., 1955. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. Géotechnique, 5(1) 7-17
10. Morgenstern, N.R., 1992. The Evaluation of Slope Stability-a 25 Year Perspective. In Stability and Performance of Slopes and Embankments, Geotechnical Special Pub. 31,

## Kritik Enerji Tesislerinin Deprem Risk Değerlendirmesinde Farklı Hasargörebilirlik Fonksiyonlarının İncelenmesi

**A. Can ZÜLFİKAR\***<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-6610-3334

**Seyhan OKUYAN AKCAN**<sup>2</sup> ORCID 0000-0001-6824-8182

**Ali YEŞİLYURT**<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-9442-1687

**Murat ERÖZ**<sup>3</sup> ORCID 0000-0002-6328-7323

**Tolga CİMİLLİ**<sup>3</sup> ORCID 0000-0002-8037-9334

<sup>1</sup>Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

<sup>2</sup>Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

<sup>3</sup>Varlık Yönetimi ve Sürdürülebilirlik, EnerjiSA Üretim, İstanbul

Geliş tarihi: 16.07.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: ZÜLFİKAR, A.C., AKCAN, S.O., YEŞİLYURT, A., ERÖZ, M., CİMİLLİ, T., (2021). Kritik Enerji Tesislerinin Deprem Risk Değerlendirmesinde Farklı Hasargörebilirlik Fonksiyonlarının İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 1019-1032.

### Özet

Elektrik enerji tesisleri, deprem tehlikesinden dolayı hasar görme olasılığı yüksek kritik altyapılardan bir tanesidir. Sanayileşmenin yoğun olduğu Marmara bölgesinde çok sayıda elektrik enerji tesisleri bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında açık kaynaklı OpenQuake yazılımı kullanılarak, Marmara bölgesi için olasılıksal deprem tehlike analizi gerçekleştirilmiştir. Deprem tehlike analizinde, SHARE projesi ,2013 Avrupa-Akdeniz sismik tehlike modelinde tanımlanan (ESHM13) kaynak ve yerel zemin etkileri mantık ağacı modelleri ile dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında, Marmara bölgesinde yer alan tipik bir enerji üretim tesisi olan Bandırma-I Doğalgaz kombine çevrim santrali deprem tehlikesi analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 2018-TBDY ve 2007-DBYBHY yönetmeliklerinde bulunan tasarım spektrumları ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu tesiste, kritik yapı olan santral kontrol binası için farklı zemin durumu ve farklı hasargörebilirlik fonksiyonlarının dikkate alındığı deprem risk değerlendirme yapılmıştır. Marmara bölgesinde meydana gelebilecek olası deprem yer hareketi sonucu, dikkate alınan tesisin maruz kalacağı risklerin tespiti ve bu risklerin azaltılmasına yönelik faaliyetlerin geliştirilebilmesi için son derece kullanışlı olan kayıp eğrileri elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Olasılıksal deprem tehlike ve risk analizi, Doğalgaz kombine çevrim santrali, Kırılganlık fonksiyonları, Hasargörebilirlik fonksiyonları

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): A. Can ZÜLFİKAR, [aczulfikar@gtu.edu.tr](mailto:aczulfikar@gtu.edu.tr)

## **Investigation of Different Vulnerability Functions in Earthquake Risk Assessment of Critical Energy Facilities**

### **Abstract**

Electrical energy facilities are one of the critical infrastructures with a high probability of being damaged due to earthquake hazard. There are many electrical energy facilities in the Marmara region, where industrialization is intense. Within the scope of this study, probabilistic earthquake hazard analysis for the Marmara region was carried out using open source OpenQuake software. In the earthquake hazard analysis, source, and local ground effects as defined in the SHARE project, 2013 “Euro-Mediterranean seismic hazard model (ESHM13)” were considered together with the logic tree models. Within the scope of the study, the earthquake hazard analysis of Bandırma-I Natural Gas combined cycle power plant, which is a typical power generation facility in the Marmara region, was carried out and the results were compared with the Turkish earthquake codes (TSC-2007 and TBDY-2018) design spectra. The earthquake risk assessment was carried out for the power plant control building, which is the critical structure in the facility in question, considering different soil conditions and different vulnerability functions. As a result of possible earthquake ground motions that may occur in the Marmara region, loss curves have been obtained, which are extremely useful for the determination of the potential risks that the considered facility will be exposed to and for the development of risk mitigation activities

**Keywords:** Probabilistic seismic hazard and risk assessment, Natural gas combined cycle power plant, Fragility functions, Vulnerability functions

### **1. GİRİŞ**

Günümüzde, tüm toplumların enerjiye olan talebi hızla artmaktadır. Buna paralel olarak elektrik tüketimi ihtiyacı da yükselmektedir. Tüm modern ve kritik altyapı sistemlerinin bağımlı hale geldiği elektrik üretimi ve dağıtım en önemli ve stratejik unsurlardan biri haline gelmiştir. Bu nedenle, elektrik üretimi ve dağıtımının afet durumları dahil her koşulda devamlılığı çok önemli bir gerekliliktir. Elektrik enerji tesisleri, deprem tehlikesinden dolayı hasar görme olasılığı yüksek kritik altyapılardan bir tanesidir. Bu sistemler, üretim tesisleri, iletim ve dağıtım ağı şeklinde 3 ana başlık altında toplanmaktadır. Bu 3 ana sınıfın herhangi bir alt elemanında oluşacak hasar, tüm sistemin aksamasına sebep olabilmektedir [1,2]. Bu sistemlerde oluşacak aksaklıklar, modern hayatın sürdürülebilmesi, acil servisler ve çeşitli altyapıların işlevselliğinin devamlılığında son derece kritik bir role sahiptir. Elektrik enerji tesisinin, bulunduğu bölgedeki ticari ve endüstriyel faaliyetlerin sürekliliği için başlıca ihtiyaçlardan olmasından dolayı, ekonomik ve sosyal hayat

üzerinde doğrudan etkisi olduğu görülmektedir. Geçmiş depremlerden sonra yapılan saha çalışmalarında, elektrik şebekelerinde oluşan yerel hasarlardan dolayı üretim ve dağıtımda aksamalar olduğu ve tamirat/bakım süresi boyunca bu aksaklıkların ilgili bölgelerde devam edebildiği görülmüştür.

11 Mart 2011 yılında Japonya’da meydana gelen Mw 9,0 büyüklüğündeki Tohoku depremi sonucu iki önemli elektrik üretim tesisinde ağır hasarların olduğu rapor edilmektedir. Söz konusu hasarların giderilip, elektrik üretiminin tekrar sağlanması için yapılan 6 günlük yenileme çalışmalarının sonucunda tesisin %90 dolaylarında faaliyete geçmesi sağlanmıştır [3]. Yeni Zelanda’nın Christchurch şehrinde meydana gelen 4 Eylül 2010, Mw 7,1 Darfield (Canterbury), 22 Şubat 2011, Mw 6,3 Christchurch ve 13 Haziran 2011, Mw 6,0 Christchurch depremleri sonucu, transformatörler aracılığı ile gerilimin yüksek formdan alçak forma dönüştürüldüğü, elektrik iletim ve dağıtımın yapıldığı şalt sahasında bulunan; 220 kV CVT, 66 kV trafo porselen buşingleri, porselen mesnet izolatörlerinde, kesicilerde, pantoğraf ayırıcılarda

ve kontrol binasında bulunan ekipmanlarda (mekanik-elektrik aksan ve muhteviyat) hafif ve orta hasarlar tespit edilmiştir. Söz konusu tesislerin, 3 deprem ayrı ayrı dikkate alındığında, hemen depremlerden sonraki 6 saatten daha kısa bir sürede yeniden faaliyete geçirilmesi sağlanmıştır [4-7]. 4 Nisan 2010, Mw 7,2 Meksika depremi sonucu, San Diego Gaz ve Elektrik (SDG & E) Trafo Merkezi'nde bulunan baraların mesnet bağlantılarında, porselen parafudurda, trafo porselen buşinglerinde ve normal ayırıcılarda hasarlar meydana gelmiştir. Söz konusu tesis için kritik elemanların tespit edilmesi ve alternatif güçlendirme çalışmaları araştırılmıştır [8]. M. Shinozuka ve arkadaşları [9] tarafından Los Angeles Department of Water and Power's (LADWP's) elektrik enerji tesisi için yapılan çalışmada, 47 deprem senaryosu dikkate alınarak elde edilen risk eğrileri ile ekonomik parametreler arasında ilişki kurulmuştur. Benzer şekilde literatürde, elektrik enerji tesislerinin sismik hasar görebilirlik değerlendirmesi için yapılmış farklı yöntem ve yaklaşımların dikkate alındığı çalışmalar mevcuttur [10-14].



Şekil 1. EnerjiSA Bandırma-I doğalgaz kombine çevrim santrali

Şekil 1'de görülen EnerjiSA Bandırma-I Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali, Balıkesir'in Bandırma ilçesinde bulunmaktadır. 936 MW kurulu güce sahip olan santral her biri 304,29 MW kapasiteli iki gaz türbinine, 500 ton/saat buhar kapasiteli iki ısı geri kazanımlı buhar jeneratörüne ve 327,6 MW kapasiteli bir buhar türbinine sahiptir. Santral, Marmara Denizi'ne yakın konumlandırılmıştır ve deniz suyu 54.000 m<sup>3</sup>/saat miktarı ile soğutma amaçlı kullanılmaktadır. Santralin ulusal elektrik şebekesine bağlantısı 380 kV şalt sahası üzerinden "Bursa DGKÇS" ve "Karabiga" Yüksek Gerilim

hatları üzerinden gerçekleşmektedir. Ayrıca doğalgaz santralının iç ihtiyacını karşılamak üzere 3,45 MW gücünde bir hidroelektrik santral de devreye alınmıştır. Santralin yıllık ortalama enerji üretim kapasitesi 7,9 TWh'dir.

Bu çalışma kapsamında, üretim kapasitesi ve bileşenlerinin detaylı olarak açıklandığı "EnerjiSA Üretim Bandırma-I Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali" için sismik tehlike analizi, söz konusu alanının tektonik yapısı, depremselliği ve sismik kaynak bölgelemesi göz önüne alınarak, açık kaynaklı bir program olan OpenQuake platformunda gerçekleştirilmiştir. Operasyonun ve üretimin devamlılığının sağlanabilmesi için en önemli yapılardan biri olan kontrol binasına ait mali kayıp değerlendirilmesinde, olasılıksal sismik risk değerlendirilmesi, "Kırılma Eğrileri" aracılığı ile yapısal hasarı ele alarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler ışığında 3 farklı hasargörebilirlik eğrisi kullanılarak çeşitli deprem senaryolarında kontrol binasında oluşabilecek olasılıksal hasar maliyetleri hesaplanmıştır. Farklı hasargörebilirlik fonksiyonlarından elde edilen ekonomik kayıplar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar, deprem sonrası eylem planlarının geliştirilebilmesi, risk değerlendirme ve azaltma çalışmaları, santralin reasürans değerlendirmesi için son derece önemli sonuçlar vermiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Depremlerin neden olduğu yıkıcı etkilerin azaltılması için sismik risk değerlendirmesi ve kayıp tahmini temel ön koşuldur [15]. Bu analizleri gerçekleştirmek için, güvenilir bir sismik tehlike modeline, kapsamlı bir yapı envanter modeline ihtiyaç duyulmakta ve bir dizi kırılma ve kayıp fonksiyonlarını kullanmak gerekmektedir [15]. Sismik risk değerlendirilmesi sonucunda, kayıp oranlarının dağılımı veya kayıpların aşma olasılığı hesaplanmaktadır.

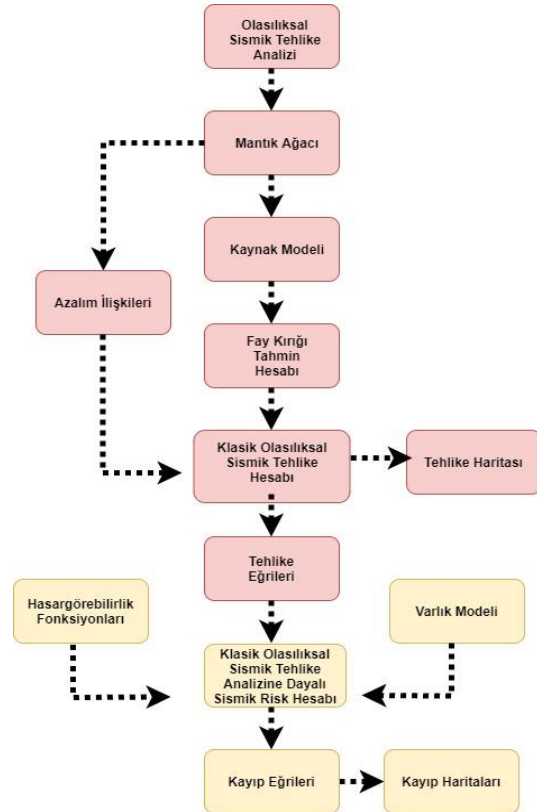
Küresel Deprem Modeli (GEM), dünya çapında deprem riskini hesaplamayı amaçlamaktadır [16]. Bu amaca yönelik sismik tehlike ve risk değerlendirme için açık kaynaklı OpenQuake yazılımını geliştirmiştir. OpenQuake projesi, Küresel Deprem Modelinin (GEM-

<http://www.globalquakemodel.org>) [17] bir parçası olarak başlatılmıştır. Bu yazılım, hedef bir bölge için senaryo bazlı veya olasılıksal sismik tehlike analizi sonucunda oluşabilecek fiziki ve sosyo-ekonomik kayıpları hesaplayabilen bir dizi hesaplayıcıdan oluşur. OpenQuake, Python programlama dilinde yazılmış açık kaynaklı, deprem tehlike ve riskini modellemek, araştırmak ve yönetmek için entegre bir ortam sunacak olan web tabanlı bir sismik değerlendirme platformudur [16].

Sismik tehlikenin belirlenmesinde bölgenin tektonik yapısı, deprem oluşumları ve yerel zemin şartları hesaba katılmaktadır. Bölgeye ait sismik veriler ile bölgede kullanılabilir yer hareketi tahmin denklemleri, olasılıksal tehlike analizi modelini oluşturmaktadır. Deterministik veya olasılıksal deprem tehlike analizlerinden elde edilen sonuçlara bağlı olarak sismik risk değerlendirilmesi yapılabilmektedir.

Olasılıksal Sismik Tehlike Değerlendirmesinin (OSTA-Probabilistic Seismic Hazard Assessment - PSHA) temel bileşenleri; deprem kaynak(lar)ının tanımlanması, her bir kaynak için deprem oluşum karakteristikleri ve yer hareketleri tahmin denklemleridir. Bu temel bileşenler, belirli bir bölgedeki farklı yer hareketi parametrelerinin aşılması ihtimalini elde etmek üzere olasılığa dayalı bir modele sayısal olarak entegre edilir [18]. Olasılıksal sismik tehlike analizi, tehlikenin olasılıklı bir tanımına dayalı olarak, tek bir varlık için kayıp olasılığı ve kayıp istatistiklerinin hesaplanmasını sağlamaktadır [16]. Bu hesaplayıcının çıktısı, örneğin risk azaltma çabalarının önceliklendirilmesi için kullanılabilen, farklı yerlerdeki varlıklar arasında karşılaştırmalı risk değerlendirmesi için kullanılmaktadır. OpenQuake platformunda yapılan tehlike analizi sonucunda tehlike eğrileri, spektrumlar ve tehlike haritaları elde edilirken, risk analizi sonucunda kayıp ve hasar dağılımı hesaplanmaktadır. OpenQuake platformu, sismik tehlike ve riskin hesaplanması için dünyadaki çeşitli kurumlar ve araştırma projeleri tarafından test edilmektedir. (Avrupa Komisyonu tarafından finanse edilen SHARE projesinde, [www.share-eu.org](http://www.share-eu.org)'da Avrupa için tehlikenin hesaplanması gibi) [16]. Şekil 2 ile

olasılıklı sismik tehlikeye bağlı olasılıklı sismik risk analizi akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 2. Klasik olasılıklı sismik tehlikeye dayalı deprem risk hesabı akış şeması

OpenQuake, Klasik OSTA tabanlı hasar hesaplayıcısı, varlığın belirli bir süre içinde hasar dağılımını vermek için, varlığın bulunduğu yerde sismik tehlike eğrisi ile bir varlık için ayrı veya sürekli hasar durumu kırılma fonksiyonlarını sayısal entegrasyon yoluyla birleştirir. Sürekli kırılma fonksiyonları, lognormal dağılımın kümülatif dağılım fonksiyonu ile hesaplanmaktadır.

Sismik kırılma ve kayıp model değerlendirilmesi, olasılıksal sismik riskin değerlendirilmesinde önemli bir adımdır [15]. Kırılma, bir dizi sismik yoğunluk ölçüm seviyesine (PGA, Sa) karşılık gelen hasar sınır durumunu aşma olasılığı olarak tanımlanır. Bir kırılma modeli ortalama ve standart sapma ile temsil edilen, lognormal



dağılımlı bir fonksiyondur. Risk analizinde, kırılma modeli, hasar dağılımını hesaplamada kullanılmaktadır. Ayrıca, kırılma modelleri, belirlenmiş sonuç modelleriyle kullanılarak hasargörebilirlik eğrisi elde etmede kullanılmaktadır. Kırılma modelleri, ayırık noktalarla ya da devamlı fonksiyon olarak tanımlanabilmektedir.

Sismik yoğunluk boyunca kayıp oranının olasılıklı dağılımı, kayıp fonksiyonlarıyla tanımlanmaktadır. Hasargörebilirlik eğrisi, yapıda oluşan hasarın oranını ifade ederken, kırılma eğrileri dikkate aldığımız herhangi bir hasar durumunun aşılma olasılığını ifade eder. Hasargörebilirlik eğrileri; kırılma eğrilerinin sonuç modelleriyle (consequence models) birlikte kullanılmasıyla elde edilebilmektedir [16]. OpenQuake platformunun mevcut sürümünde ayırık olarak tanımlanan kayıp fonksiyonları, ölümler veya onarım maliyetleri gibi olabilecek kayıpları doğrudan modellemek için kullanılır [15]. Sismik yoğunluk seviyesine (PGA, PGV, Sa) denk gelen ortalama kayıp oranı ve bu orana ait varyasyon katsayısı kullanılarak olasılıklı dağılım olarak OpenQuake platformunda kayıp eğrileri tanımlanabilmektedir.

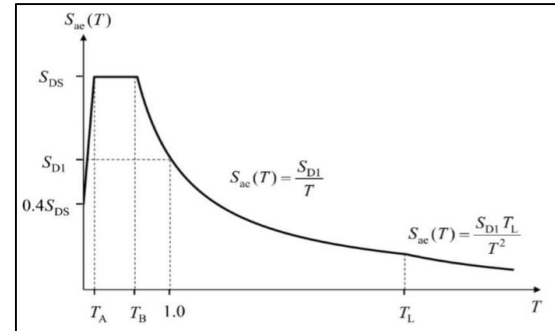
Bu çalışmada, açık kaynaklı bir program olan OpenQuake ile çalışma bölgesinin, tektonik yapısı, depremselliği ve sismik kaynak bölgelemesi göz önüne alınarak, Bandırma-I DGKÇS kontrol binası için olasılıklı sismik tehlike analizi gerçekleştirildi. Deprem tehlike analizi sonuçları kullanılarak, hedef yapıda kayıp değerlendirilmesinde, olasılıksal sismik risk analizi gerçekleştirilmiştir. Sismik risk değerlendirilmesinde, üç farklı hasargörebilirlik fonksiyonu kullanılarak kayıplar hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında, sahaya özel olasılıksal deprem tehlike analizi yapılmış, elde edilen spektrum, DBYBHY 2007 [19] ve TBDY2018 [20] tasarım spektrumlarıyla karşılaştırılmıştır. Tasarım ivme veri setinin belirlenmesinde, sahaya özel tehlike analizi spektrumları kullanılmıştır. Gerek zemin ve gerekse yakın fay etkilerini göz önüne alarak belirlenmiş olan sahaya özgü, %5 sönümlü spektrum eğrileri ile 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kapsamında yer alan tasarım esaslı, yatay davranış spektrumları 475 ve 2475 yıllık

ortalama tekrarlanma periyotları için hesaplanmıştır. TBDY2018 [20]'e göre deprem düzeyleri tekrarlanma periyoduna göre;

- DD-1=50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
- DD-2=50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
- DD-3=50 yılda aşılma olasılığı %50 (tekrarlanma periyodu 72 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
- DD-4=50 yılda aşılma olasılığı %68 (tekrarlanma periyodu 43 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi

olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 3'te TBDY2018 tasarım spektrumu gösterilmiştir. Spektrum detayları TBDY2018 [20], 2.bölümde anlatılmaktadır.



Şekil 3. TBDY 2018 [20] - %5 sönümlü yatay elastik tasarım ivme spektrumu [20]

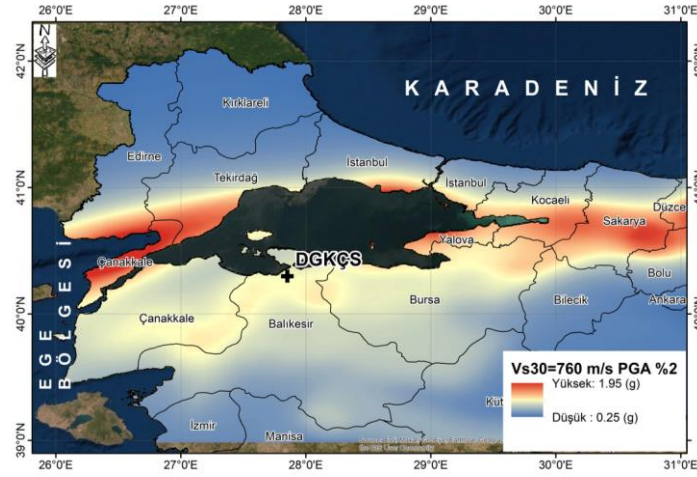
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Marmara Bölgesi Deprem Tehlike Analizi

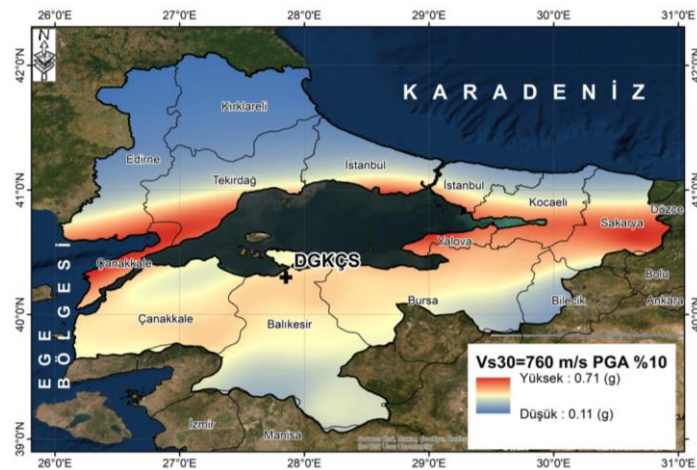
OpenQuake platformunda, risk hesap akış şeması olarak senaryoya dayalı risk analizi, klasik olasılıklı risk analizi ve(veya) olaya bağlı olasılıklı risk analizi bulunmaktadır. OpenQuake platformunda, Marmara bölgesi ve Bandırma-I DGKÇS kontrol binasının bulunduğu konum için olasılıksal deprem tehlike analizi hesabı gerçekleştirildi. Çalışma kapsamında, SHARE projesinde ESHM13

modelinde [21] tanımlanan, alan kaynak, çizgi kaynak ve arka plan kaynak modelleri dikkate alınmıştır. Sismik tehlikeyi tanımlamak için yer hareketi tahmin denklemleri (YHDT) olarak Chiou&Youngs (2008) [22] modeli kullanılmıştır. 50 yıllık süre için sismik tehlike analizleri gerçekleştirildi. Zemin bağımlı ve zemin bağımsız olmak üzere iki farklı olasılıksal sismik tehlike analizi gerçekleştirildi. Zemin bağımsız durum için 30 m derinlikte zemin kayma hızı ( $V_{s,30}$ ) 760 m/s olarak tanımlandı. Zemin bağımlı durum için 30 m derinlikte zemin kayma hızı ( $V_{s,30}$ ) 360 m/s olarak

tanımlandı. NEHRP [23] zemin sınıflandırması referans alınarak,  $V_{s,30}=760$ m/s değeri ZB zemin sınıfı,  $V_{s,30}=360$ m/s değeri ZD zemin sınıfı olarak dikkate alındı. OpenQuake platformunda gerçekleştirilen, olasılıklı sismik tehlike analizi sonucunda, Marmara bölgesinde, PGA dağılımları, 475 yıl ve 2475 yıl dönüş periyotlu deprem yer hareketi düzeyi için irdelenmiştir. Olasılıksal sismik tehlike analizi sonucunda zemin bağımsız durum için 475 yıl ve 2475 yıl dönüş periyotlu deprem yer hareketi düzeyine ait PGA dağılımı sırasıyla Şekil 4-5'te verilmiştir.

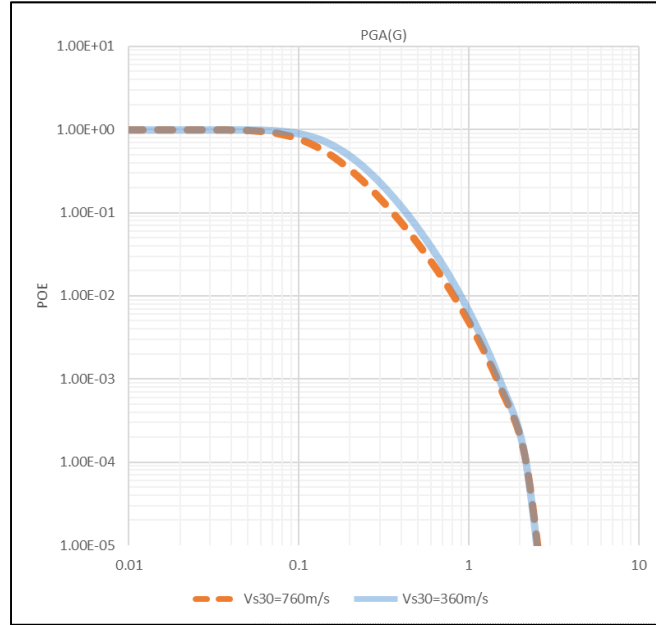


Şekil 4. Marmara Bölgesi için 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan (2475 yıl) deprem yer hareketi düzeyine ait PGA Dağılımı ( $V_{s,30}=760$  m/s)



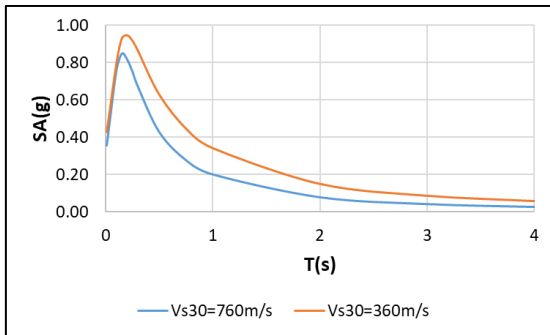
Şekil 5. Marmara Bölgesi için 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan (475 yıl) deprem yer hareketi düzeyine ait PGA Dağılımı ( $V_{s,30}=760$  m/s)



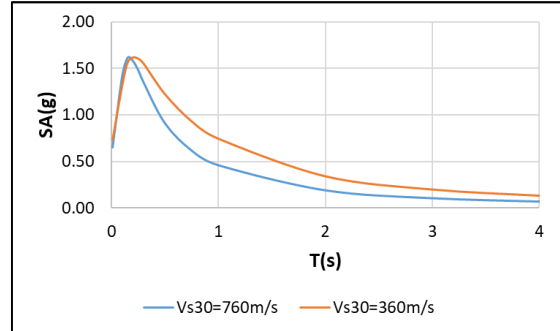


Şekil 8. Zemin bağımlı ve zemin bağımsız durum için Bandırma-I DGKÇS'e ait tehlike eğrileri

Olasılıksal deprem tehlike analizi sonucunda, Bandırma-I DGKÇS kontrol binası için zemin bağımlı ve zemin bağımsız durum için tehlike spektrum eğrisi, deprem tekrarlanma periyodu (475 yıl ve 2475 yıl) için elde edildi. Şekil 9-10'da Bandırma-I DGKÇS kontrol binası için her bir deprem tekrarlanma periyoduna göre iki farklı zemin durumu için elde edilen spektrum eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 9. Zemin bağımlı ve zemin bağımsız durumlara ait Bandırma-I DGKÇS kontrol binasının bulunduğu yere ait spektrum eğrileri (475yıl tekrarlanma periyodu)

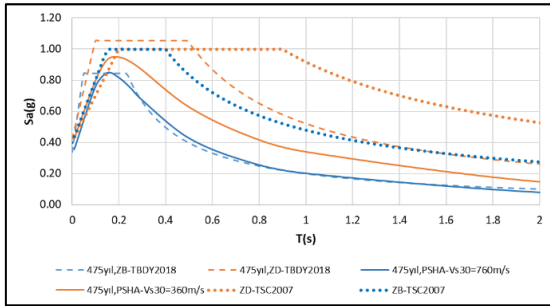


Şekil 10. Zemin bağımlı ve zemin bağımsız durumlarına ait Bandırma-I DGKÇS kontrol binasının bulunduğu yere ait spektrum eğrileri (2475 yıl tekrarlanma periyodu)

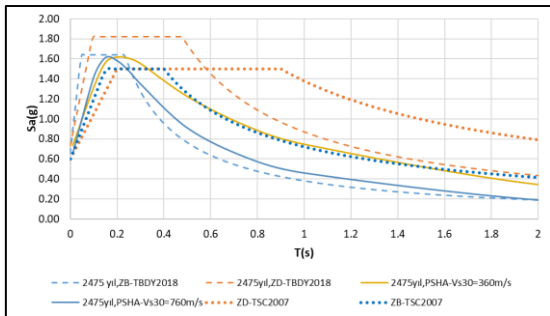
Elde edilen sahaya özel spektrum eğrileri, %5 sönümlü DD1, DD2 deprem düzeylerine ait TBDY 2018 [20]'de ifade edilen spektrumlar ile DBYBHY2007 [19]'de birinci derece deprem bölgesi için sunulan tasarım spektrumları dikkate alınarak, karşılaştırmalı incelemesi sırasıyla, Şekil 11 ve Şekil 12' de gösterilmiştir. Yapılan bu karşılaştırmada, yönetmeliklerde sunulan, zemin bağımlı duruma (ZD zemin sınıfına) ait ve zemin

bağımsız duruma (ZB zemin sınıfına) ait spektrumlar dikkate alınmıştır. Spektrum hesabında, Uzaklık, fay tipi ve derinlik gibi deprem bilgileri ve istasyon bilgileri parametreleri kullanılmıştır.

Şekil 11-12’de gösterildiği gibi ZD ( $V_{s,30}=360$  m/s), ZB ( $V_{s,30}=760$  m/s) zemin koşullarında, sahaya özel sismik tehlike analizinden elde edilen spektrum, DD1- ve DD-2 deprem düzeyi için TBDY 2018 spektrumu ve birinci derece deprem bölgesi için DBYDBH2007 tasarım spektrumuyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 11. 475 yıl dönüş periyot deprem için (DD-2), ZB ( $V_{s,30}=760$  m/s) ve ZD ( $V_{s,30}=360$  m/s) zemin koşulları için sahaya özel tehlike spektrumlarının TBDY 2018 ve DBYBHY 2007 spektrumlarıyla karşılaştırılması



Şekil 12. 2475 yıl dönüş periyot deprem için (DD-1), ZB ( $V_{s,30}=760$  m/s) ve ZD ( $V_{s,30}=360$  m/s) zemin koşulları için sahaya özel tehlike spektrumlarının TBDY 2018 ve DBYBHY 2007 spektrumlarıyla karşılaştırılması

DD-1 seviyesinde deprem için, ZB zemin şartlarında, sahaya özel spektrum TBDY2018 spektrumu ve DBYBHY 2007 ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. ZD zemin şartlarında TBDY2018 spektrumu, sahaya özel spektrumdan daha yukarı seviyede kalırken, DBYBHY2007 spektrumu daha aşağı seviyede kalmaktadır. DD-1 deprem seviyesinde, ZB zemin koşulu için olasılıksal sismik tehlike analizi sonucunda elde edilen spektrum, sismik tasarımda kullanılması geçerli olurken, ZD zemin koşulları için bölgede TBDY2018 tasarım spektrumunun kullanılması gerekmektedir.

DD-2 seviyesinde deprem için, ZB zemin şartlarında sahaya özel spektrum TBDY2018 spektrumu ile uyumlu olurken, DBYBHY 2007 spektrumundan aşağı seviyede kalmaktadır. ZD zemin şartlarında TBDY2018 ve DBYBHY2007 spektrumu, sahaya özel spektrumdan daha yukarı seviyede kalmaktadır. DD-2 deprem seviyesi, ZB zemin koşulu için olasılıksal sismik tehlike analizi sonucunda elde edilen spektrum, sismik tasarımda kullanılması geçerli olurken, ZD zemin koşulları için bölgede TBDY2018 tasarım spektrumunun kullanılması gerekmektedir.

Bandırma-I DGKÇS kontrol binası için yapılacak olan olasılıksal sismik risk değerlendirilmesine bağlı olarak hesaplanacak olan ekonomik kayıp tahmininde, olasılıksal sismik tehlike analizinden elde edilen sismik tehlike eğrisi dikkate alınacaktır.

### 3.2. Bandırma-I DGKÇS Kontrol Binası, Deprem Risk Değerlendirme Analizi

Bir Enerji Santrali’nde doğal afetler sonrasında da üretimin devamlılığının sağlanabilmesi için en kritik yapılardan birisi de Santral Kontrol Bina’sıdır. Santralin tüm üretim süreci bu binadaki Kontrol Odası’ndan takip edilir ve yönetilir.

Çalışma kapsamında dikkate alınan mevcut Kontrol Binası, 42,1 m X 22,6 m boyutlarında, iki katlı, betonarme karkas bir yapı olarak tasarlanmıştır. Bina taşıyıcı sistemi betonarme çerçeveler ve perdelerden oluşacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 13).





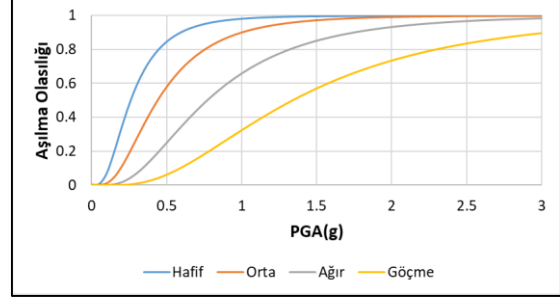
Şekil 13. EnerjiSA Bandırma-I DGKÇS kontrol binası genel görünüş

Kontrol Bina'ları, kontrol odasının yanı sıra, Enerji Santrallerinde üretimin devamlılığı için çok önemli olan C&I odası, akü odası, düşük/orta gerilim odaları vb. kritik ekipman odalarını muhteva eder (Şekil 14). Bu bina, santralin ana kontrol merkezidir. Sahaya giden tüm sinyal ve enerji kabloları bu binada toplanmaktadır.



Şekil 14. EnerjiSA Bandırma-I DGKÇS kontrol binası, düşük gerilim odası

Bu çalışmada dikkate alınan herhangi bir deprem tehlikesi için yapıda oluşacak hasar dağılımlarının değerlendirilmesinde, Hazus [24]'da sünek az katlı özel betonarme yapılara ait hafif, orta, ağır ve göçme hasar durumları için sunulan kırılma olasılığı fonksiyonu dikkate alınmıştır. Bu eğri maksimum yer ivmesinin (PGA) bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Az katlı, sünek, özel betonarme yapılara ait Hazus [24]'da tanımlanan kırılma olasılığı eğrisi Şekil 15'te gösterilmiştir. Yapısal hasar dağılımında PGA, deprem yer hareketi parametresi dikkate alınmıştır.



Şekil 15. Dört farklı hasar seviyesi için, az katlı, özel betonarme yapı sınıfına ait dikkate alınan kırılma olasılığı eğrisi [24]

Bir kırılma olasılığı modelinin geliştirilmesi, genellikle kayıp tahmin çalışmasının ilk adımlarındandır. Bir dizi kayıp modelleri için dikkate alınan sonuç modeli, kırılma olasılığı modeliyle birleştirilerek sismik risk değerlendirilmesinde kullanılabilir. Bu çalışmada, HAZUS [24], Askan&Yücemen (2010) [25], ve Bal ve arkadaşları (2008) [26] tarafından önerilen sonuç modeli kullanılarak, yapısal elemanlara ait kırılma olasılığı modelleri, kayıp modellerine dönüştürülmüştür. Çizelge 1, bu çalışmada kullanılan hasar durumlarına karşı kayıp oranlarını göstermektedir.

Çizelge 1. Hasargörebilirlik eğrisini oluşturmada kullanılan sonuç modelleri

Hasar Durumu	Askan & Yücemen (2010)	Bal ve arkadaşları (2008)	Hazus (1997)
Hafif	0,05	0,16	0,02
Orta	0,30	0,33	0,10
Ağır	0,85	1,00	0,50
Göçme	0,85	1,00	1,00

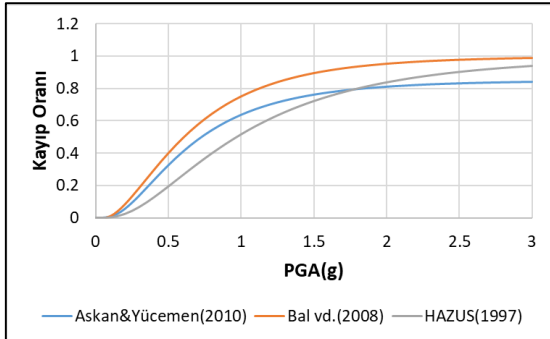
Sismik risk değerlendirilmesinde kullanılan hasargörebilirlik eğrisi, kırılma olasılığı eğrilerinin sonuç modelleriyle (consequence models) birlikte kullanılmasıyla, Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır [27]. Eşitlik 1'de yer alan  $I$  deprem şiddet parametresini (PGA,  $S_a$ , vb.),  $i$ , gözönüne alınan deprem şiddet parametresinin değerini,  $hd$  her bir hasar durumunu (hafif, orta, ağır, göçme),  $KO_{hd}$ , her bir hasar durumunda, sonuç modelleriyle elde edilen, ortalama kayıp oranını (loss ratio) (Çizelge 1'de her hasar durumu için farklı sonuç modellerinde,

ortalama kayıp oranı tanımlanmıştır.) göstermektedir.

$E[KayıpOranı|I=i]$ ; hasargörebilirlik eğrisinde, deprem şiddet parametresinin,  $i$  değeri için beklenen kayıp oranını göstermektedir.  $E[KayıpOranı|I=i]$ ; deprem şiddet parametresinin  $i$  değerine eşit olduğu anda, tanımlanan 4 farklı hasar durumunda, kırılmalık eğrilerine bağlı olarak, sonuç modellerinde verilen ortalama kayıp oranı hesaba katılarak elde edilmektedir. Eşitlik 1 kullanılarak, ilgili yapıya ait, gözönüne alınan deprem şiddet parametresine bağlı hasargörebilirlik eğrisi elde edilmektedir.

$$E[KayıpOranı|I=i] = \sum_{hd=0}^{nHD} (P[HD = hd|I=i] \cdot KO_{hd}) \quad (1)$$

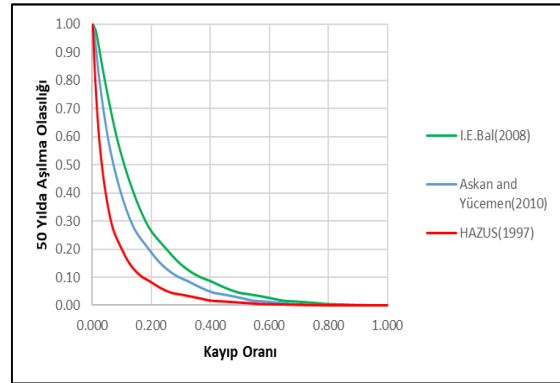
Yapısal elemanlara ait hasargörebilirlik eğrisi, Askan&Yüçemen (2010) [25], Bal ve arkadaşları (2008) [26], ve Hazus (1997) [24] sonuç modeli ve Hazus [24]'dan alınan kırılmalık fonksiyonu Eşitlik (1) içinde kullanılarak, Şekil 16'daki gibi elde edilmiştir.



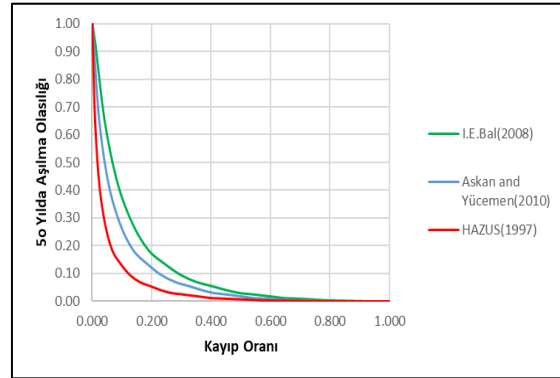
Şekil 16. Dikkate alınan farklı sonuç fonksiyonları için elde edilen hasargörebilirlik eğrileri

Ekonomik kayıplar, hasargörebilirlik eğrilerinin deprem risk analizi modelinde kullanılmasıyla hesaplanmaktadır. Hasargörebilirlik eğrilerinde tanımlanan her bir deprem parametresindeki (PGA) kayıp oranları, bu deprem parametrelerinin deprem tehlikesinden hesaplanan aşılma olasılıklarıyla birlikte kullanılarak, ekonomik kayıpların aşılma olasılıkları tanımlanan zaman aralığı için hesaplanmaktadır. OpenQuake programıyla yapılan olasılıksal deprem risk analizi sonucunda yapısal

elemanlara ait mali kayıp oranlarının ve kayıp miktarlarının, 50 yılda aşılma olasılığı, zemin bağımlı ve zemin bağımsız durum için Şekil 17 ve Şekil 18 ile gösterilmiştir. Çizelge 2 ve Çizelge 3'te farklı zemin koşullarında, risk analizinden elde edilen 50 yılda aşılma olasılığı %2 ve %10 olan yer hareketi sonucu oluşabilecek yapısal kayıp oranları verilmiştir.



Şekil 17. Yapıya ait risk analizi sonucu elde edilen kayıp eğrileri ( $V_{s,30}=360$  m/s)



Şekil 18. Yapıya ait risk analizi sonucu elde edilen kayıp eğrileri ( $V_{s,30}=760$  m/s)

Olasılıksal deprem risk analizi sonucunda, Çizelge 2-3'te gösterildiği gibi, zemin bağımlı durum için Ekonomik kayıp oranı en yüksek Bal ve arkadaşları (2008) [26] modelinde hesaplanırken, en düşük Hazus [24] modelinde hesaplanmıştır. Ayrıca, yumuşak zemin ( $V_{s,30}=360$  m/s) koşullarında, ekonomik kayıpların, sert zemin ( $V_{s,30}=760$  m/s) koşullarındaki ekonomik kayıplara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.



**Çizelge 2.** Farklı deprem seviyeleri için yapısal kayıp oranları ( $V_{s,30}=360$  m/s)

Deprem Seviyesi	Askan & Yücemem (2010)	Bal ve arkadaşları (2008)	Hazus (1997)
DD-1(2475 yıl)	0,80	0,90	0,60
DD-2(475 yıl)	0,30	0,40	0,20

**Çizelge 3.** Farklı deprem seviyeleri için yapısal kayıp oranları ( $V_{s,30}=760$  m/s)

Deprem Seviyesi	Askan & Yücemem (2010)	Bal ve arkadaşları (2008)	Hazus (1997)
DD-1(2475 yıl)	0,65	0,70	0,40
DD-2(475 yıl)	0,15	0,25	0,10

#### 4. SONUÇLAR

Günümüzde, sosyo-ekonomik hayatın sürdürülmesinde, elektrik üretimi önemli bir role sahiptir. Elektrik şebekeleri, deprem tehlikesinden dolayı hasar görme olasılığı yüksek kritik altyapılardan bir tanesidir. Bu sistemlere ait üretim tesisleri, iletim ve dağıtım açısından herhangi birinde oluşacak aksaklıklar, enerji üretiminde kesintilere sebep olacaktır. Bu durum tesislerin bulunduğu bölgedeki ticari ve endüstriyel faaliyetlerin aksamasına sebep olabilir. Elektrik üretim aşamasında tüm operasyonel faaliyetlerin, otomasyon yöntemi ile kumanda ve kontrol edildiği, üretimin devamlılığının sağlandığı merkez bina, kontrol binasıdır.

Bu çalışma kapsamında, üretim kapasitesi ve bileşenlerinin detaylı olarak açıklandığı “EnerjiSA Üretim Bandırma-I Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali” için deprem tehlike analizi ve tip kontrol binası risk değerlendirmesi, söz konusu alanının tektonik yapısı, deprenselliği ve sismik kaynak bölgelemesi göz önüne alınarak, açık kaynaklı bir program olan OpenQuake kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için, santralin bulunduğu bölgeye özel olarak değerlendirilen olasılıksal deprem tehlike analiz sonuçları kullanılmıştır. Hasar ve kayıp değerlendirilmesinde ise yapıya ait Hazus’da sunulan kırılma eğrisi dikkate alınarak, üç farklı hasargörebilirlik modeli kullanılmıştır. Ayrıca, ekonomik kayıp, zemin

bağımlı ve zemin bağımsız durum için değerlendirilmiştir.

Olasılıksal deprem tehlike analizinden elde edilen sahaya özel deprem yer hareketi spektrumları, DBYBHY 2007 ve TBDY-2018 standart deprem yer hareketi spektrumu ile karşılaştırılmıştır. DD-1 ve DD-2 deprem seviyesinde, ZB zemin koşulu için olasılıksal tehlike analizi sonucunda elde edilen spektrum, sismik tasarımda kullanılması geçerli olurken, ZD zemin koşulları için bölgede TBDY2018 tasarım spektrumunun kullanılması gerekmektedir.

Olasılıksal deprem risk analizi sonucunda, zemin bağımlı ve bağımsız durumlarda tehlikenin herhangi bir aşılma olasılığı için en yüksek kayıp oranı Bal ve arkadaşları [26] modelinde hesaplanırken, en düşük Hazus [24] modelinde hesaplandığı gözlemlenmiştir. Askan&Yücemem [25] modeli dikkate alınarak elde edilen kayıp oranları incelendiğinde ise üç modelin ortalama değerlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, tehlikenin her aşılma olasılığında, zayıf zemin koşullarında elde edilen kayıp oranları daha yüksek çıkmaktadır. Tehlikenin farklı aşılma olasılıklarında bu fark değişmektedir. Örneğin 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan tehlike durumunda zayıf zemin koşullarında elde edilen kayıp oranları yaklaşık 2 katı arttığı gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında sunulan kayıp eğrileri, EnerjiSA Üretim Bandırma-I DGKÇS’nin deprem sonrası eylem planlarının geliştirilebilmesi ve Enerji Santralleri için en kritik konulardan biri olan; oluşabilecek üretim kaybı süresinin öngörülebilmesi konusunda önemli veriler sağlamaktadır. Bu çalışmanın devamında elde edilen sonuçlar kullanılarak, kontrol binasının yapısal hasarından dolayı üretimin kesintiye uğrama süresi çalışılabilir.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Massie, A., Watson, N.R., 2011. Impact of the Christchurch Earthquakes on the Electrical Power System Infrastructure. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 44(4), 425-430.

2. Watson, N.R., 2010. Impact of the Darfield Earthquake on the Electrical Power System Infrastructure. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 43(4), 421-424.
3. Eiding, J., Davis, C., Tang, A., Kempner, L., 2012. 9.0M Tohoku Earthquake, March 11, 2011, Performance of Water and Power Systems, <http://www.geengineeringsystems.com/>.
4. Eiding, J., Tang, A., O'Rourke, T., 2010. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering (TCLEE), Report of the 4 September 2010 Mw 7.1 Canterbury (Darfield), New Zealand Earthquake. In *American Society of Civil Engineers*, 1-49.
5. Giovinazzi, S., Wilson, T.M., Davis, C., Bristow, D., Gallagher, M., Schofield, A., Tang, A., 2011. Lifelines Performance and Management Following the 22 February 2011 Christchurch Earthquake, New Zealand: Highlights of Resilience.
6. Transpower (2011a). 4 September 2010 Darfield Earthquake. Lessons Learned. Transpower New Zealand Limited Internal Report, 30 March 2011.
7. Transpower (2011b). 22 February 2011 Christchurch Earthquake Key Findings and Lessons Learned. Transpower New Zealand Limited Internal Report, 30 June 2011.
8. Howard, S., Riker, C., Knight, B., Knoles, S., 2015. Innovative Analysis and Seismic Retrofit of 500kV Flexible Bus Substation Support Structures. In *Electrical Transmission and Substation Structures 2015*, 438-451.
9. Shinozuka, M., Dong, X., Jin, X., Cheng, T.C., 2005. Seismic Performance Analysis for the Ladwp Power System. In *2005 IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition Asia and Pacific*, 1-6.
10. Park, J., Nojima, N., Reed, D.A., 2006. Nisqually Earthquake Electric Utility Analysis. *Earthquake Spectra*, 22(2), 491-509.
11. Buriticá Cortés, J.A., Sánchez-Silva, M., Tesfamariam, S., 2015. A Hierarchy-based Approach to Seismic Vulnerability Assessment of Bulk Power Systems. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(10), 1352-1368.
12. Kwasinski, A., Eiding, J., Tang, A., Tundo-Bornarel, C., 2014. Performance of Electric Power Systems in the 2010-2011 Christchurch, New Zealand, Earthquake Sequence. *Earthquake Spectra*, 30, 205-230.
13. Yesilyurt, A., Okuyan Akcan, S., Zulfikar, A., 2021. Rapid Power Outage Estimation for Typical Electric Power Systems in Turkey. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 7(2), 84-92.
14. Holmgren, A.J., Molin, S., 2006. Using Disturbance Data to Assess Vulnerability of Electric Power Delivery Systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 12(4), 243-251.
15. Martins, L., Silva, V., 2020. Development of a Fragility and Vulnerability Model for Global Seismic Risk Analyses. *Bull. Earthq. Eng.*
16. Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Modelli, D., Pinho, R., 2013b. Development of the OpenQuake Engine, the Global Earthquake Model's Open-source Software for Seismic Risk Assessment, *Natural Hazards*.
17. Pinho, R., 2012. GEM: A Participatory Framework for Open, State-of-the-art Models and Tools for Earthquake Risk Assessment Worldwide. In: *Proceedings of the 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal.
18. Cornell, C.A., 1968. Engineering Seismic Risk Analysis. *Bull Seismol Soc Am* 58, 1583-1606.
19. Yönetmeliği, TD. 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi.
20. TBDY-2018, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>, 416, 2018.
21. Woessner, J., Laurentiu, D., Giardini, D., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Valensise, G., Arvidsson, R., Basili, R., Demircioglu, M.B., Hiemer, S., Meletti, C., Musson, R.W., Rovida, A.N., Sesetyan, K., Stucchi, M., 2015. The 2013 European Seismic Hazard Model: Key Components and Results, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 3553-3596. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9795-1>.

22. Chiou, B.J., Youngs, R.R., 2008. An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 24(1), 173-215.
23. FEMA 356 (Federal Emergency Management Agency), 2000. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington DC.
24. FEMA (Federal Emergency Management Agency), 2003. HAZUS-MH Technical Manual. Washington DC:
25. Askan, A., Yucemen, M.S., 2010. Probabilistic Methods for the Estimation of Potential Seismic Damage: Application to Reinforced Concrete Buildings in Turkey, *Struct. Saf.*, 32(4), 262–271.
26. Bal, İ.E., Crowley, H., Pinho, R., Gülay, F.G., 2008. Detailed Assessment of Structural Characteristics of Turkish RC Building Stock for Loss Assessment Models, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(10-11), 914-932.
27. Martins, L., Silva, V., Marques, M., Crowley, H., Delgado, R., 2016. Development and Assessment of Damage-to-loss Models for Moment-frame Reinforced Concrete Buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(5), 797-817.

## A Bandpass Frequency Selective Surface Filter for Earth Observation Satellite and Radar Applications

Olca ALTINTAŞ\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-3237-4392

<sup>1</sup>Iskenderun Technical University, Faculty of Engineering and Natural Science, Department of Electrical and Electronics Engineering, Iskenderun/Hatay

Geliş tarihi: 09.07.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: ALTINTAŞ, O., (2021). A Bandpass Frequency Selective Surface Filter for Earth Observation Satellite and Radar Applications. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 1033-1040.

### Abstract

In this paper, a bandpass frequency selective surface filter has been suggested for the satellite and radar applications at X band frequency regime. The study has been conducted both numerically and experimentally in a wide range frequency band between 2 GHz and 14 GHz. 2 GHz of 3 dB bandwidth between 7.3 GHz and 9.3 GHz has been obtained. The proposed structure has the polarization insensitive characteristic. It also has angular stability with the incident angle ranges from 0° to 60° with very small frequency deviations both TE and TM polarization modes. The prototype of the FSS structure is composed of 20x20 unit cells in a dimension of 18cm x 18 cm. The experimental studies have been conducted by using Agilent PNA-L vector network analyzer with two horn antennas. The bandpass filter can be effectively used in many satellite and radar systems as an antenna radome to prevent noises and to reject unwanted frequency bands

**Keywords:** FSS, Bandpass filter, Satellite, Radar

### Yer Gözlem Uydusu ve Radar Uygulamaları için Bant Geçiren Frekans Seçici Yüzey Filtresi

#### Öz

Bu makalede, X bant frekans rejiminde uydu ve radar uygulamaları için bir bant geçiren frekans seçici yüzey filtresi önerilmiştir. Çalışma 2 GHz ile 14 GHz arasındaki geniş bir frekans bandında hem sayısal hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. 7.3 GHz ile 9.3 GHz arasında 2 GHz 3 dB bant genişliği elde edilmiştir. Önerilen yapı polarizasyona duyarız özelliğe sahiptir. Ayrıca, hem TE hem de TM polarizasyon modlarında çok küçük frekans sapmaları ile 0° ila 60° arası geliş açısı aralıklarıyla açılabilir kararlılığa sahiptir. FSS yapısının prototipi 18cm x 18cm boyutlarında 20x20 birim hücrelerden oluşmaktadır. Deneysel çalışmalar Agilent PNA-L vektör ağ analizörü ve iki huni anten kullanılarak

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Olca ALTINTAŞ, [olca.altintas@iste.edu.tr](mailto:olca.altintas@iste.edu.tr)

gerçekleştirilmiştir. Bant geçiren filtre, gürültüleri önlemek ve istenmeyen frekans bantlarını reddetmek için bir anten radomu olarak birçok uydu ve radar sisteminde etkin bir şekilde kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** FSS, Bant geçiren filtre, Uydu, Radar

## 1. INTRODUCTION

The satellite and radar technologies have been of strategic importance for many research respects such as military, aviation, weather forecast, and even extraterrestrial. Observation radars and research satellites have been especially need advance antenna systems to explore the environment at the best possible standard. In this perspective, the antenna performance can be increased by using different technical solutions to eliminate or to filter the noise and unexpected incident waves. The metamaterials (MTMs), electromagnetic band gap structures (EBGs), high impedance surfaces (HISs), frequency selective surfaces (FSSs) can be listed as some methods to manipulate electromagnetic waves. Among this methods, FSS structures are strongly improved as band pass [1-5] or band stop filters [6-7] in a wide range frequency bands.

Researchers have suggested the FSS structures in various satellite and earth observation radar applications in microwave and terahertz regimes. Morrow et al. have studied a low profile FSS structure for radar earth observation. The unit cell of the proposed FSS structure have consist of dual circular loop and it performs at X band frequency regime [8]. Deng et al. have proposed a quad-band reflect array antenna for Ku/Ka band satellite communication applications. The reflect array antenna is operated at the frequencies of 12.5 GHz, 14.25 GHz, 20.4 GHz and 30.2 GHz with the aperture efficiencies of 45.6%, 44%, 56% and 54.8%, respectively [9]. Smith et al. have suggested an L- and Ka-band satellite communication antenna with an FSS-backed circularly polarized reflect array. The operating frequencies of the shared aperture antenna are 1575 MHz, 20 GHz and 30 GHz [10]. Ferraro et al. have investigated incident angle and polarization dependent characteristics of a cross shaped FSS terahertz filter. The proposed structure have been a good candidate for terahertz filter or

sensing applications [11]. Euler et al. have improved a FSS based split slot ring shaped liner to circular polarization converter. This submillimeter wave transmission polarizer have achieved 11.75% of 3 dB axial ratio bandwidth between 300 GHz and 340 GHz [12]. Machado et al. proposed an ultra-thin FSS absorber structures for spacecraft thermal blanket. Five different absorber designs have constructed using polyethylene terephthalate (PET) material with the 140 micron thickness. The optimum operating frequency of the hexagonal patch array based FSS absorbers is around 10 GHz [13]. Dickie et al. have discussed a FSS design and fabrication difficulty for future space science technology at millimeter to submillimeter wave wavelength. They have offered a new reconfigurable FSS with piezoelectric actuators which provide high frequency dynamic switch at 275 GHz [14]. Poojali et al. have examined the factors which influence the performance of an FSS structure in microwave regime. The structure have exhibited polarization independent and angle stability characteristics with low loss on a dielectric substrate for atmospheric remote sensing [15].

In this study, a complementary fractal loop bandpass FSS filter have been achieved at the operating frequencies of earth observation satellites and their downlinks which covers the frequency ranges between 7.5 GHz and 9 GHz. The study have been realized both numerically and experimentally at the frequencies between 2 GHz and 14 GHz. The evolution phases during the design process has been examined and the parametric study is realized to determine exact operating frequency of the proposed filter. The polarization and incident angle dependences of the bandpass FSS filter have been also investigated both numerically and experimentally. The numerical studies have been conducted by using a commercial, finite integration technique (FIT) based full wave solver. The experimental studies have been performed by using Agilent PNA-L

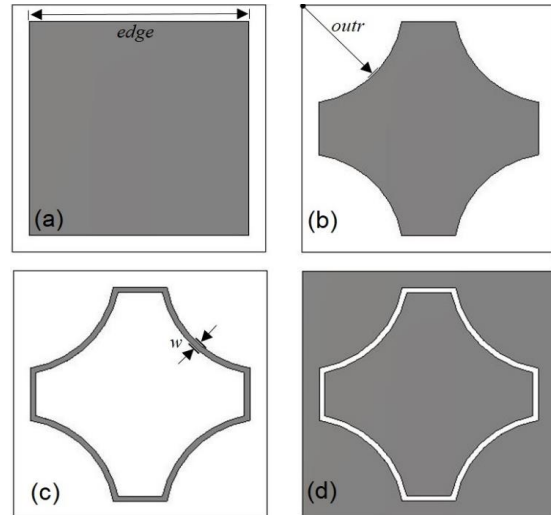
vector network analyzer (VNA) having a working frequency between 10 MHz and 43.5 GHz. Also, two horn antennas operates between 3 GHz and 18 GHz have been used during the experimental works. The proposed bandpass FSS filter is rejected L- S- and X- band except for a 3 dB frequency band between 7.3 GHz and 9.3 GHz. It is a good bandpass filter candidate for earth observation satellite and radar applications.

## 2. GEOMETRY DESIGN OF THE FSS STRUCTURE

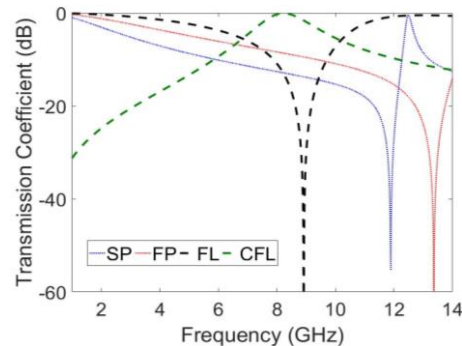
The FSS structure is consist of periodically adjusted unit cells. The FR4 type material with a thickness of 1.6 mm and a dielectric constant of 4.3 is chosen as substrate layer. Perfect electric conductor (PEC) is selected as metallic layer. The unit cell dimension of the FSS structure is 9 mm x 9 mm. Unit cell boundary conditions have been arrange along x- and y- directions to calculate S- parameters in periodic aspect.

The geometry design of the proposed structure is divided into four sections as shown in Figure 1. In Figure 1(a), the square patch (SP) has been created with an edge length parameter 'edge'. This capacitive surface act as a narrow bandpass filter at the frequency range between 2 GHz and 14 GHz as shown in Figure 2. After that the fractal patch (FP) has been obtained by subtracting quarter circle at each corner of the square patch as demonstrated in Figure 1(b). The circle radius parameter is called 'outr' and the fractal patch is also exhibit a capacitive surface characteristics. In the third phase of geometry design, fractal loop (FL) with a line thickness parameter 'w' has been carved out as illustrated in Figure 1(c). In this phase, the band stop filter behavior has been observed at the operating frequency range as shown in Figure 2, since the fractal loop geometry has the characteristics of inductive surface. Finally, the complementary fractal loop (CFL) shape FSS structure has been created in Figure 1(d) to obtain a certain bandpass frequency range at operating band. The parameter values of edge, outr and w has been determined as 7.8 mm, 3.6 mm and

0.2 mm, respectively. The 3 dB operating frequency band of CFL shaped FSS structure is between 7.3 GHz to 9.3 GHz as shown in Figure 2.



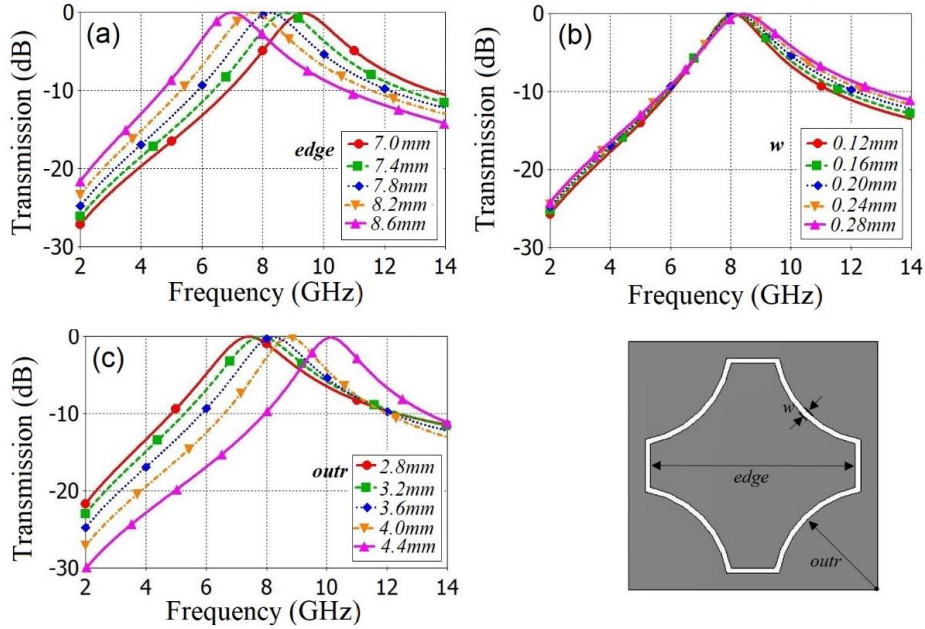
**Figure 1.** The geometry design sections of the proposed structure; (a) SP, (b) FP, (c) FL and (d) CFL



**Figure 2.** Transmission coefficients of the geometry design section of the proposed structure

## 3. NUMERICAL STUDIES

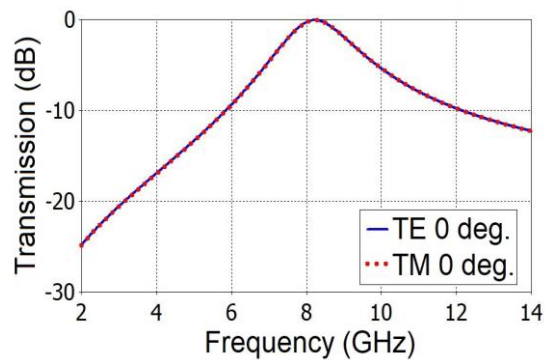
The numerical studies of the proposed bandpass FSS filter have been conducted by using a FIT based simulation software at the frequency range between 2 GHz and 14 GHz. The parametric studies, polarization and incident angle sensitivity have been investigated in this section.



**Figure 3.** Parametric studies of the proposed structure; (a) edge, (b) w and (c) outr

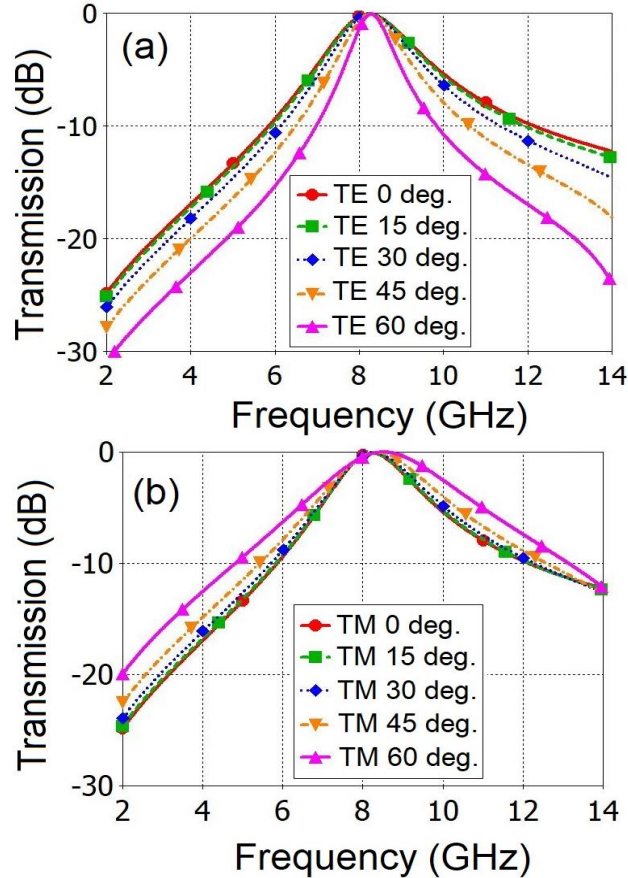
The edge length parameter ‘edge’ is studied between 7.0 mm and the 8.6 mm by increasing 0.4 mm at each step. The maximum transmission frequency point is linearly decreased with rising the value of the edge as illustrated in Figure 3(a). This variation is explained with increasing the overall capacitive value of the proposed FSS structure. Secondly, the line thickness parameter ‘w’ is examined between 0.12 mm and 0.28 mm by varying 0.04 mm at each step. The slight changes have been observed in the maximum transmission frequency point while the thickness parameter changes in narrow scale as demonstrated in Figure 3(b). Finally, the circle radius parameter ‘outr’ has been observed between 2.8 mm and 4.4 mm by changing 0.4 mm at each step. The maximum transmission frequency point is decreasingly shifted by reducing the parameter outr as shown in Figure 3(c). The parameter values of the proposed band pass filter structure have been selected as 7.8 mm, 3.6 mm and 0.2 mm for edge, outr and w. Hence, the operating frequency band of structure (between 7.3 GHz and 9.3 GHz) with these parameter values covers the working frequency ranges of the earth observation satellites and their downlinks at L- and X- bands.

The transmission band result of the filter are numerically observed for TE and TM polarization condition under normal incident angle as plotted in Figure 4. The transmission response is obtained as the same results for both polarization. The transmission bandwidth values are given as the percentile ratio of 3 dB bandwidth to of the central frequency of operating band. The 3 dB bandwidth has been obtained 23.8% for both polarizations. It is concluded that the proposed structure exhibits polarization insensitive characteristic.



**Figure 4.** TE and TM polarization comparison at normal incident angle





**Figure 5.** Transmission coefficients of (a) TE and (b) TM polarization under different incident angle

The transmission response has also investigated under different incident angle conditions ranging from  $0^\circ$  to  $60^\circ$  for both TE and TM mode as illustrated in Figure 5. The maximum frequency deviation for TE mode occurs  $0.6\%$  in  $60^\circ$  of incident angle with  $11.5\%$  of 3 dB bandwidth of the centre frequency as shown in Figure 5(a). For the TM mode, it arises  $3.3\%$  in  $60^\circ$  of incident angle with  $37.5\%$  of 3 dB bandwidth as shown in Figure 5(b).

#### 4. FABRICATION AND EXPERIMENTAL STUDIES

The experimental studies of the proposed FSS structure have conducted to prove the numerical results. The prototype of the FSS structure has

been fabricated by a single sided FR4 type dielectric material. The manufactured structure is composed of  $20 \times 20$  unit cells with dimensions of  $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$  as shown in Figure 6(a). This prototype is tested by Agilent PNA-L VNA between the frequencies of 3 GHz and 14 GHz. Two horn antennas has been used to observe network parameters as demonstrated in Figure 6(b). The distance between the horn antennas and prototype FSS is adjusted by considering the Fresnel region (near field radiative region). This radiative region can be calculated as  $2D^2/\lambda$ .  $D$  and  $\lambda$  represents the largest antenna dimension and wavelength of the central frequency of operating band, respectively.

The numerical and experimental results have been compared for TE and TM mode in Figure 7 and 8,

respectively. The loss originated from fabrication errors is around 1 dB both TE and TM polarization mode for  $0^\circ$  and  $60^\circ$ . The 3 dB bandwidths of central frequencies in TE mode are about 22% and 17.5% for  $0^\circ$  and  $60^\circ$ , respectively as shown in Figure 7. In TM mode, the bandwidths are about 21.8% and 29.8% for  $0^\circ$  and  $60^\circ$ , respectively as plotted in Figure 8. The maximum frequency

deviations are 0.8% and 3.4% for TE and TM mode, respectively for incident angle from  $0^\circ$  to  $60^\circ$ . It can be seen from Figure 7 and 8 that a slight frequency differences which is originated from fabrication and calibration errors were occurred between measured and simulated results. However, the results are in a good agreement with respect angular stability and 3 dB bandwidth.

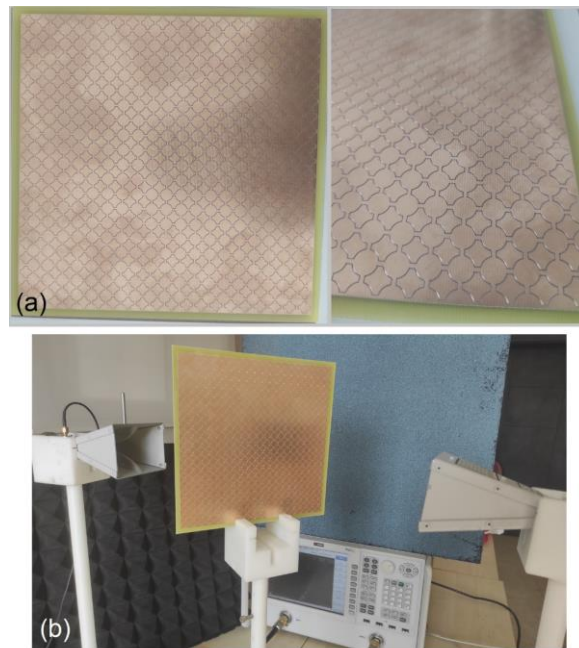


Figure 6. (a) Fabricated prototype of FSS structure and (b) experimental setup

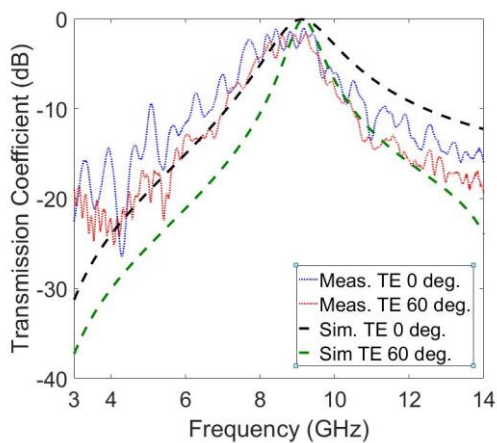


Figure 7. Comparison of simulation and measurement results for TE mode

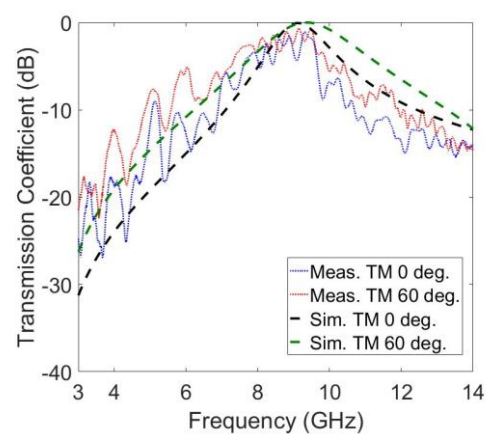


Figure 8. Comparison of simulation and measurement results for TM mode

## 5. CONCLUSION

In this paper, complementary fractal loop shaped bandpass FSS filter has been proposed for the applications of earth observations satellites and radars. The transmission band of the proposed FSS filter is from 7.3 GHz to 9.3 GHz. The FSS filter structure is studied both numerically and experimentally between the frequency ranges between 2 GHz and 14 GHz. It has angular stability with small frequency deviation and polarization insensitivity characteristics. The transmission band of the proposed FSS structure contains downlink frequencies of some satellites such as Terra, Aqua, ERS-2, EROS A1, Landsat, and etc. The bandpass FSS structure can be effectively used in these type of satellite systems by preventing noise and undesired frequencies and by improving signal to noise ratio.

## 6. REFERENCES

1. Chou, H.H., Ke, G.J., 2021. Narrow Bandpass Frequency Selective Surface with High Level of Angular Stability at Ka-Band. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 31(4), 361-364.
2. Zhao, Z., Li, J., Shi, H., Chen, X., Zhang, A., 2018. A Low-profile Angle-insensitive Bandpass Frequency-selective Surface Based on Vias. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 28(3), 200-202.
3. Wu, W., Liu, X., Cui, K., Ma, Y., Yuan, Y., 2017. An Ultrathin and Polarization-insensitive Frequency Selective Surface at Ka-band. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(1), 74-77.
4. Hussein, M., Zhou, J., Huang, Y., Al-Juboori, B., 2017. A Low-profile Miniaturized Second-order Bandpass Frequency Selective Surface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 2791-2794.
5. Li, H., Yang, C., Cao, Q., Wang, Y., 2016. An Ultrathin Bandpass Frequency Selective Surface with Miniaturized Element. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 341-344.
6. Kocakaya, A., Çakır, G., 2018. Novel Angular-independent Higher Order Band-stop Frequency Selective Surface for X-band Applications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(1), 15-22.
7. Panwar, R., Lee, J.R., 2017. Progress in Frequency Selective Surface-based Smart Electromagnetic Structures: A Critical Review. *Aerospace Science and Technology*, 66, 216-234.
8. Morrow, I.L., Morrison, K., Finnis, M., Whittow, W., 2015. A Low Profile Retrodirective Frequency Selective Surface for Radar Earth Observation. *Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC) 1-4, IEEE*.
9. Deng, R., Xu, S., Yang, F., Li, M., 2018. An FSS-backed Ku/Ka Quad-band Reflectarray Antenna for Satellite Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(8), 4353-4358.
10. Smith, T., Gothelf, U., Kim, O.S., Breinbjerg, O., 2013. An FSS-backed 20/30 GHz Circularly Polarized Reflectarray for a Shared Aperture L- and Ka-band Satellite Communication Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(2), 661-668.
11. Ferraro, A., Zografopoulos, D.C., Caputo, R., Beccherelli, R., 2017. Angle-resolved and Polarization-dependent Investigation of Cross-shaped Frequency-selective Surface Terahertz Filters. *Applied Physics Letters*, 110(14), 141107.
12. Euler, M., Fusco, V., Cahill, R., Dickie, R., 2010. 325 GHz Single Layer Sub-millimeter Wave FSS Based Split Slot Ring Linear to Circular Polarization Converter. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(7), 2457-2459.
13. Machado, G.G., Cahill, R., Fusco, V., Conway, G., 2019. Resistively Loaded Ultra-thin FSS Absorbers for Radio-frequency Enhancement of Spacecraft Thermal Blankets. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 13(11), 1928-1933.
14. Raymond, D., Cahill, R., Baine, P., Fusco, V.F., 2018. FSS Design and Manufacturing Challenges for Future Space Science Missions.

- 12<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018) 507-4.
- 15.** Poojali, J., Ray, S., Pesala, B., Chitti, K.V., Arunachalam, K., 2017. Study of Factors Influencing Performance of Substrate Backed FSS for Millimeter Wave Atmospheric Remote Sensing. 11<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP) 1282-1286.

## Performance Benchmarking of Active-Front-End Rectifier Topologies Used in High-Power, High-Voltage Onboard EV Chargers

Mehmet Uğraş CUMA\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-6040-0362

Murat Mustafa SAVRUN<sup>2</sup> ORCID 0000-0001-5847-5082

<sup>1</sup>Çukurova University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Adana

<sup>2</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Adana

Geliş tarihi: 30.07.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

*Atıf şekli/ How to cite: CUMA, M.U., SAVRUN, M.M., (2021). Performance Benchmarking of Active-Front-End Rectifier Topologies Used in High-Power, High-Voltage Onboard EV Chargers. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 1041-1050.*

### Abstract

High power onboard battery chargers employed in electric vehicles (EVs) and plug-in hybrid EVs (PHEVs) fed from three-phase mains typically consist of a two-stage structure as AC-DC and DC-DC stages. The AC-DC stage is also known as the active front end (AFE). While the AFE rectifies the mains voltage, maintains the power factor, and provides a constant DC-link voltage to the DC-DC converter, the DC-DC converter stage regulates the charging current considering the charging algorithms in order to extend the battery service life. This study focuses on the selection of cost/performance effective AFE topology that can be used in high power onboard chargers. Four different suitable AC-DC topologies are investigated: (i) 3-phase 2-level rectifier, (ii) 3-phase, 3-level neutral-point-clamped (NPC) rectifier, (iii) 3-phase, 3-level T-type rectifier, and (iv) Vienna rectifier. In this study, the aforementioned AFE topologies have been simulated on the PLECS/SpeedFit environment and compared in terms of efficiency, losses, temperature, the number of switching elements, cost and cost/efficiency metrics. The performance results of the aforementioned topologies have been evaluated under different operating frequencies. The results reveal that the most suitable topology alternatives for the front-end AC-DC converter are 3-phase 2-level PWM rectifier and Vienna rectifier. Although the 3-phase 2-level PWM rectifier is superior with its 12% cost advantage, fewer components, and ease of control advantages, it lags a little behind the Vienna rectifier in terms of total harmonic distortion.

**Keywords:** Onboard battery charger, Electric vehicle, Plug-in, Active front end, rectifier

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mehmet Uğraş CUMA, mcuma@cu.edu.tr

## **Yüksek Güçlü, Yüksek Gerilimli Yerleşik EV Şarj Cihazlarında Kullanılan Active-Front-End Doğrultucu Topolojilerinin Performans Kıyaslaması**

### **Öz**

Üç fazlı şebekeden beslenen Elektrikli araçlarda (EA'lar) ve plug-in hibrit EV'lerde (PHEA'lar) kullanılan yüksek güçlü yerleşik batarya şarj cihazları genellikle AA-DA ve DA-DA olarak iki aşamalı bir yapıdan oluşur. AA-DA aşaması, active-front-end (AFE) olarak da bilinir. AFE, şebeke gerilimini doğrultup, güç faktörünü düzenleyip ve DA-DA dönüştürücüye sabit bir DC-bara gerilimi sağlarken, DA-DA dönüştürücü aşaması, batarya ömrünü uzatmak için şarj algoritmalarını dikkate alarak şarj akımını regüle eder. Bu çalışma, yüksek güçlü yerleşik şarj cihazlarında kullanılacak maliyet/performans açısından etkin AFE topolojisinin seçimine odaklanmaktadır. Uygun olan dört farklı AA-DA topolojisi incelenmiştir: (i) 3-fazlı 2-seviyeli doğrultucu, (ii) 3-fazlı, 3-seviyeli nötr nokta-bağlantılı (NPC) doğrultucu, (iii) 3-fazlı, 3-seviye T tipi doğrultucu ve (iv) Viyana doğrultucu. Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen AFE topolojileri PLECS/SpeedFit ortamında simüle edilmiş ve verimlilik, kayıplar, sıcaklık, anahtarlama elemanları sayısı, maliyet ve maliyet/verimlilik ölçütleri açısından karşılaştırılmıştır. Söz konusu topolojilerin performans sonuçları farklı çalışma frekansları altında değerlendirilmiştir. Sonuçlar, front-end AA-DA dönüştürücü için en uygun topoloji alternatiflerinin 3 fazlı 2 seviyeli PWM doğrultucu ve Viyana doğrultucu olduğunu ortaya koymaktadır. 3 fazlı 2 seviyeli PWM doğrultucu %12 maliyet avantajı, daha az bileşen ve kontrol kolaylığı avantajları ile üstün olmasına rağmen, toplam harmonik bozulma açısından Viyana doğrultucunun biraz gerisinde kalmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Araçüstü batarya şarj cihazı, Elektrikli araç, Fişli, Active-front-end, Doğrultucu

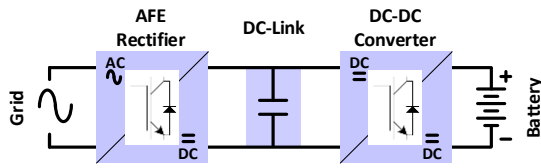
### **1. INTRODUCTION**

Transportation has a great portion of primary energy consumption across the world [1]. In view of the fact that a large part of the energy for the transportation sector has been supplied by fossil fuels, spreading the utilization of electric vehicles (EVs) and plug-in hybrid EVs (PHEVs) is a promising phenomenon in order to decrease the usage of fossil fuels and greenhouse gas emission. One of the essential components of the EVs are the batteries and hence the onboard battery chargers (OBCs) that are employed to charge the batteries from ac grid and to provide galvanic isolation between EVs and grid. Typically, OBCs are categorized into two as single-stage and two-stage power conversion [2]. While the single-stage OBCs have large low-frequency ripples in the output current, two-stage OBCs reject inherent low-frequency ripple in the output current [3, 4]. As illustrated in Figure 1, two-stage OBCs are composed of AC-DC, DC-DC converter stages and a dc-link capacitor. The three-phase AC-DC converter stage, which is widely used in various

industrial applications and named active front end, rectifies the mains voltage, maintains the power factor and provides a controllable DC-link voltage to the DC-DC converter [5].

Recently, various studies have been carried out in order to improve the performance of AFE in the aspect of dc-link voltage control, dc-link voltage ripple, total harmonic distortion (THD) [6], power factor and the size of dc-link capacitor [7] in OBCs. Traditional rectifiers that are composed of a three-phase diode bridge (passive rectifiers) and phase-controlled thyristor structures have some drawbacks of dc-link voltage based on grid instantaneous state, low power factor, and harmonic line currents. Thus, pulse-width-modulated (PWM) rectifier structures are frequently employed to improve the input/output performance of the AFE in modern EVs [8]. PWM based AFE rectifiers are categorized into two as two-level and multilevel. While the two-level topologies excel with reduced switching component and reduced computational load/complexity, the multilevel topologies such as

Vienna rectifier [9, 10], Swiss rectifier [11,12], T-type rectifier [13], NPC rectifier [14], and matrix converter [15] offer reduced size, switching frequency and stress [16]. Some authors [15,17,18] have been classified, compared, and discussed the existing AFE rectifiers to explain their basic functions and control methodologies.



**Figure 1.** Circuit configuration of two-stage OBCs

In the meanwhile, the size and cost in addition to the performance of AFE topologies are the other essential aspects to make them available for EVs. Although several studies have addressed the performance comparison of AFE topologies in the literature, studies evaluating AFE topologies in terms of size and cost as well as performance are lacking.

In this paper, comprehensive researches about four different suitable AFE topologies as; (i) 3-phase 2-level rectifier, (ii) 3-phase, 3-level neutral-point-clamped (NPC) rectifier, (iii) 3-phase, 3-level T-type rectifier, and (iv) Vienna rectifier used in studies with power over 20 kW have been presented. The study focuses on the terms of efficiency, losses, temperature, the number of switching elements, cost and cost/performance metrics of AFEs. The switching/conduction/total losses, junction temperature, and efficiency evaluations of the related topologies have been carried out under different switching frequencies on the PLECS/SpeedFit environment. In addition, the comparison of the topologies regarding the number of switching elements, cost, and cost/performance have been performed.

The rest of the paper is organized as follows: Section II introduces the specifications, power circuits, and the performance evaluations of the aforementioned AFE topologies. Section III presents the benchmarking of the related AFE

topologies in terms on cost metrics. Section IV puts forward conclusions with relevant discussion.

## 2. AFE RECTIFIER TOPOLOGIES AND PERFORMANCE EVALUATIONS

This section of the paper describes the topologies and design specifications of AFEs and evaluates the performance waveforms, switching/conduction/total losses, junction temperatures, and efficiency values of them. AFE topologies have been determined considering the most commonly used Level-2 OBCs in EVs [19]. The related topologies have been simulated considering the design specifications given in Table 1 which corresponds to Level-2 charger features. SiC MOSFETs of a certain manufacturer (CREE) have been used in order to make a correct comparison between topologies. Simulations have been performed under different switching frequencies of 10 kHz and 20 kHz to investigate the effects of it on efficiency, temperature and waveforms. The thermal coefficients and additional heat source on heatsink have been determined as high to examine the worst-case scenario.

**Table 1.** Design specifications of AFEs

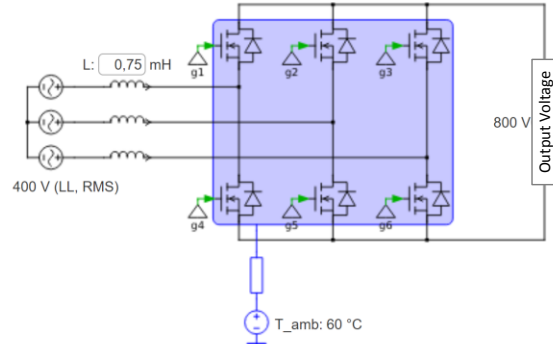
Parameters	Values
Input voltage	400 V AC
Nominal output voltage	800 V DC
Nominal output power	22 kW
Junction-case thermal resistance	0.45 C/W
Case-cooler thermal resistance	0.2 C/W
Ambient temperature	60 °C
Additional heat source on heatsink	300 W

### 2.1. 3-Phase 2-Level Rectifier

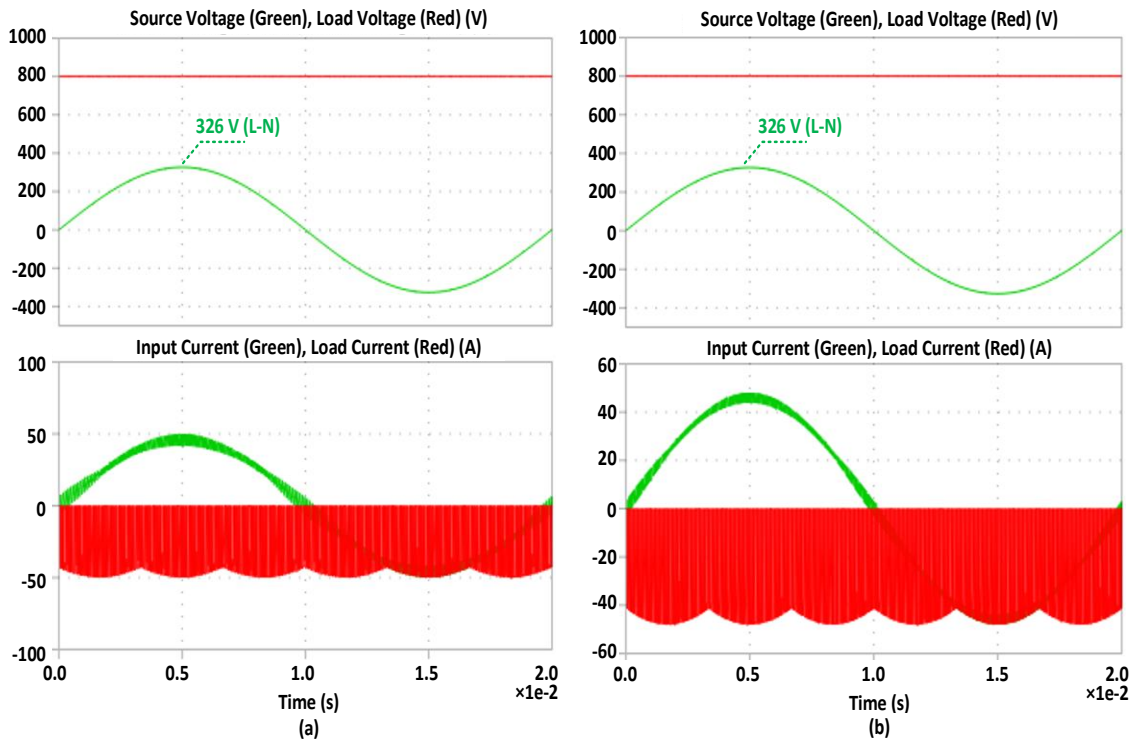
The circuit configuration of the 3-phase 2-level rectifier which is one of the most commonly used rectifier type is shown in Figure 2. It consists of input inductances of 0.75 mH and six C3M0032120D MOSFETs. A three-phase full-bridge converter is able to reach high power levels



and makes it possible to reduce the charging times of EVs. The body diodes of the MOSFETs provide a bidirectional current path. Thus, the related AFE topology also allows power transfer from the vehicle to the grid that is the concept called V2G. In addition, the topology is able to reconfigure by bypassing one leg in order to operate as an H-bridge inverter to supply other loads [20]. The performance results of the rectifier performed under switching frequencies of 10 kHz and 20 kHz are illustrated in Figure 3(a) and Figure 3(b), respectively.



**Figure 2.** Circuit configuration of 3-phase 2-level rectifier



**Figure 3.** Performance waveforms of 3-phase 2-level rectifier under (a) 10 kHz (b) 20 kHz switching frequencies

As shown in Figure 3, the grid voltage is rectified and regulated to constant 800 V with sinusoidal input current. It can be observed that the high frequency current ripples and harmonic distortion in the input current are high in comparison with multilevel topologies. The input current/voltage

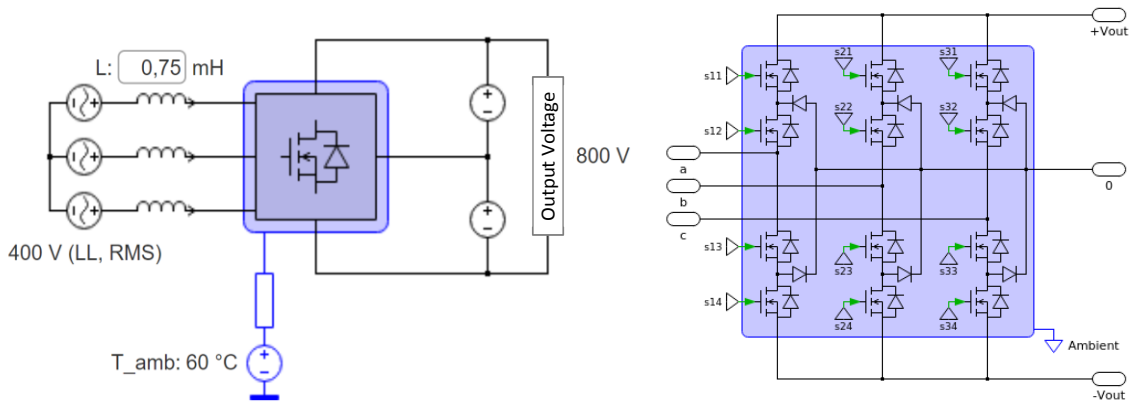
waveforms reveal the power factor is approximately 1.

## 2.2. 3-Phase, 3-Level NPC Rectifier

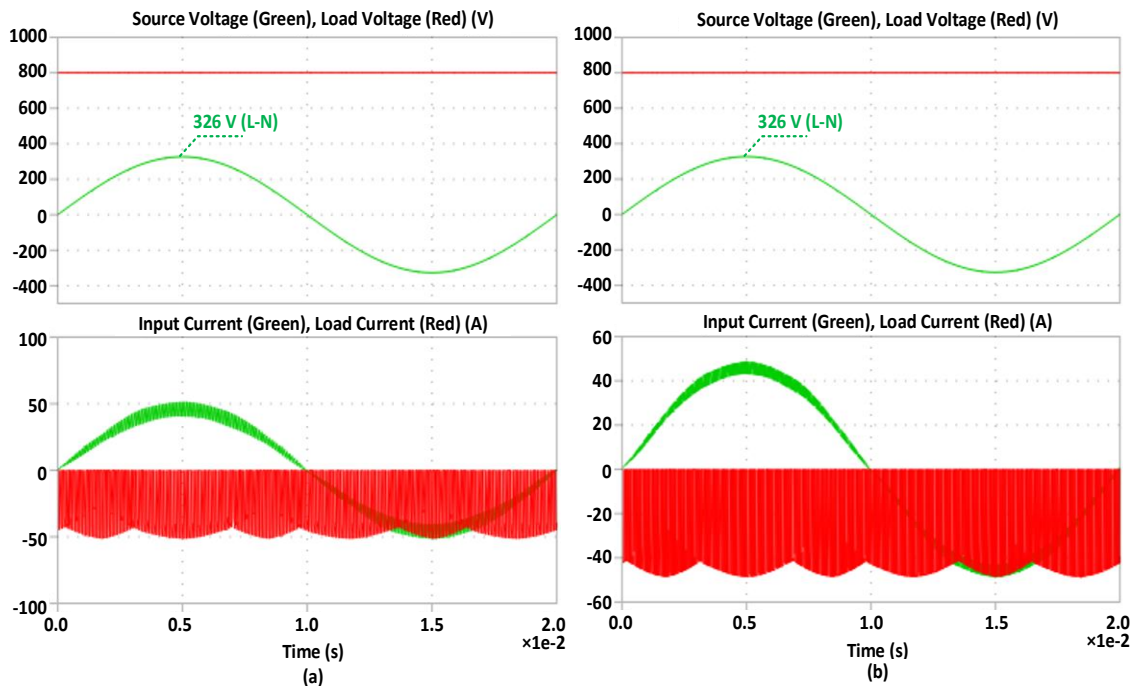
The circuit configuration of the 3-phase 3-level NPC rectifier which is adopted to reduce the

voltage stress of MOSFETs, the size of the dc-link capacitor, and current harmonics is shown in Figure 4. It consists of input inductances of 0.75 mH and twelve switches with neutral point diodes. The MOSFETs and diodes are C3M0045065D, C3D20065D, respectively. Although it has some advantages in capacitor size, voltage stress, and

harmonics, it has more switching elements and high control complexity [21]. The performance results of the simulations performed under switching frequencies of 10 kHz and 20 kHz are illustrated in Figure 5(a) and Figure 5(b), respectively.



**Figure 4.** Circuit configuration of 3-phase 3-level NPC rectifier



**Figure 5.** Performance waveforms of 3 phase 3-level NPC rectifier under (a) 10 kHz (b) 20 kHz switching frequencies

As shown in Figure 5, the grid voltage is rectified and regulated to constant 800 V and the balanced and sinusoidal line currents are drawn from the ac grid. It can be observed that the three-level topology eliminates the high frequency current ripples and harmonic distortion drawbacks of two-level topology. The power factor is controlled around unity as can be seen from the input current/voltage waveforms.

### 2.3. 3-Phase, 3-Level T-Type Rectifier

The circuit configuration of the 3-phase 3-level T-type rectifier, which has such advantages; low conduction/switching losses, simple operation principle and low switches stress in comparison with 3-phase 3-level NPC rectifier topology is shown in Figure 6 [22]. It consists of input inductances of 0.75 mH, six C3M0032120D MOSFETs, and six C3M0045065D side MOSFETs. The performance results of the simulations performed under switching frequencies of 10 kHz and 20 kHz are illustrated in Figure 7(a) and Figure 7(b), respectively.

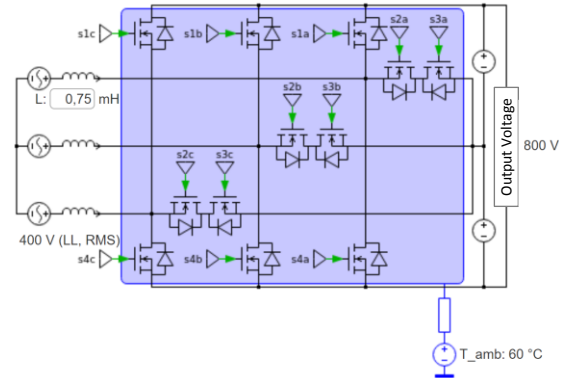


Figure 6. Circuit configuration of 3-phase 3-level T-type rectifier

As shown in Figure 7, the grid voltage is rectified and regulated to constant 800 V and the balanced and sinusoidal line currents are drawn from the ac grid. It can be observed that the total harmonic distortion (THD) of input current in phases is about acceptable limits. The power factor is controlled around unity as can be seen from the input current/voltage waveforms.

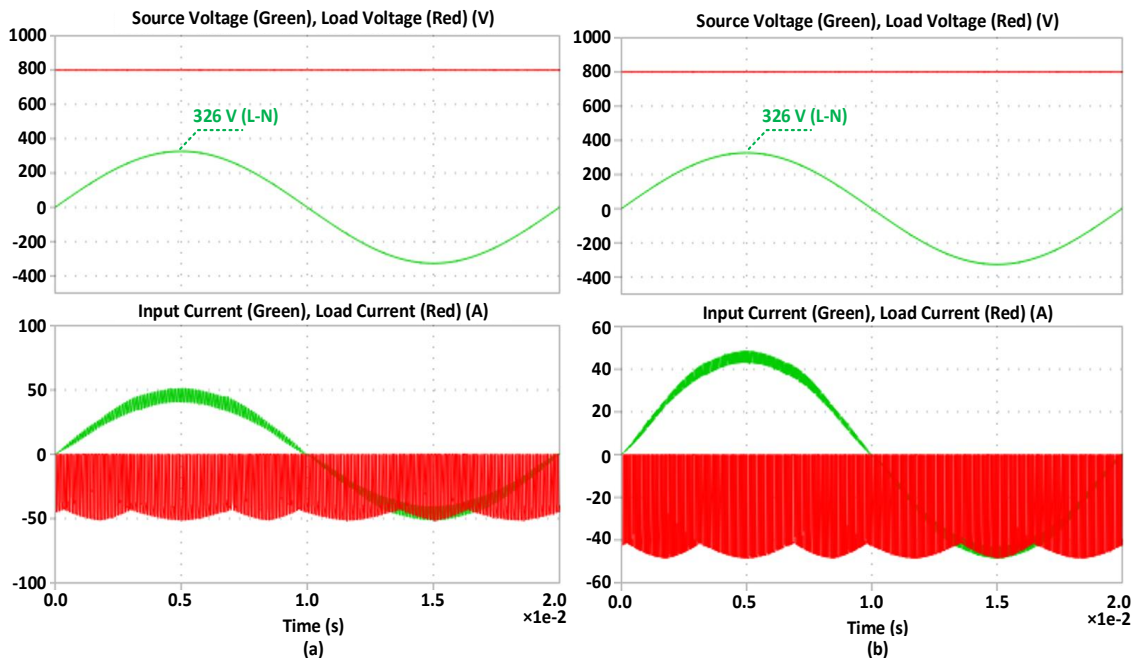


Figure 7. Performance waveforms of 3 phase 3-level T-type rectifier under (a) 10 kHz (b) 20 kHz switching frequencies

### 2.4. Vienna Rectifier

The circuit configuration of the Vienna rectifier, which is the most frequently used rectifier type in OBCs because of reduced switch and control complexity, is shown in Figure 8. It consists of input inductances of 0.75 mH, six C4D40120D diodes, and six C3M0045065D MOSFETs. The converter allows unidirectional power flow because of diodes in the legs. Thus, it is usually used in applications that do not require regeneration or controllable input reactive power [23]. The performance results of the simulations performed under switching frequencies of 10 kHz and 20 kHz are illustrated in Figure 9(a) and Figure 9(b), respectively.

As shown in Figure 9, the grid voltage is rectified and regulated to constant 800 V and the balanced and sinusoidal line currents are drawn from the ac grid. It can be observed that the total harmonic

distortion (THD) of input current in phases is about acceptable limits. The power factor is controlled around unity as can be seen from the input current/voltage waveforms.

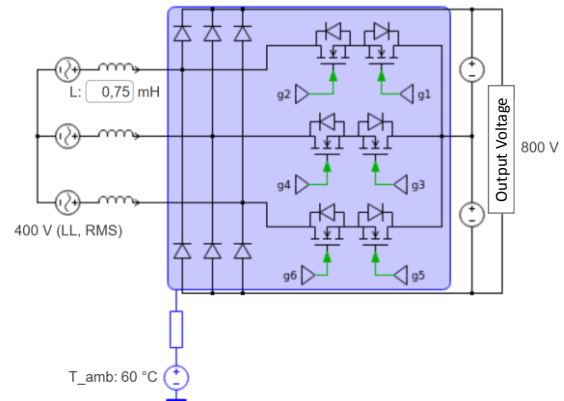


Figure 8. Circuit configuration of Vienna rectifier

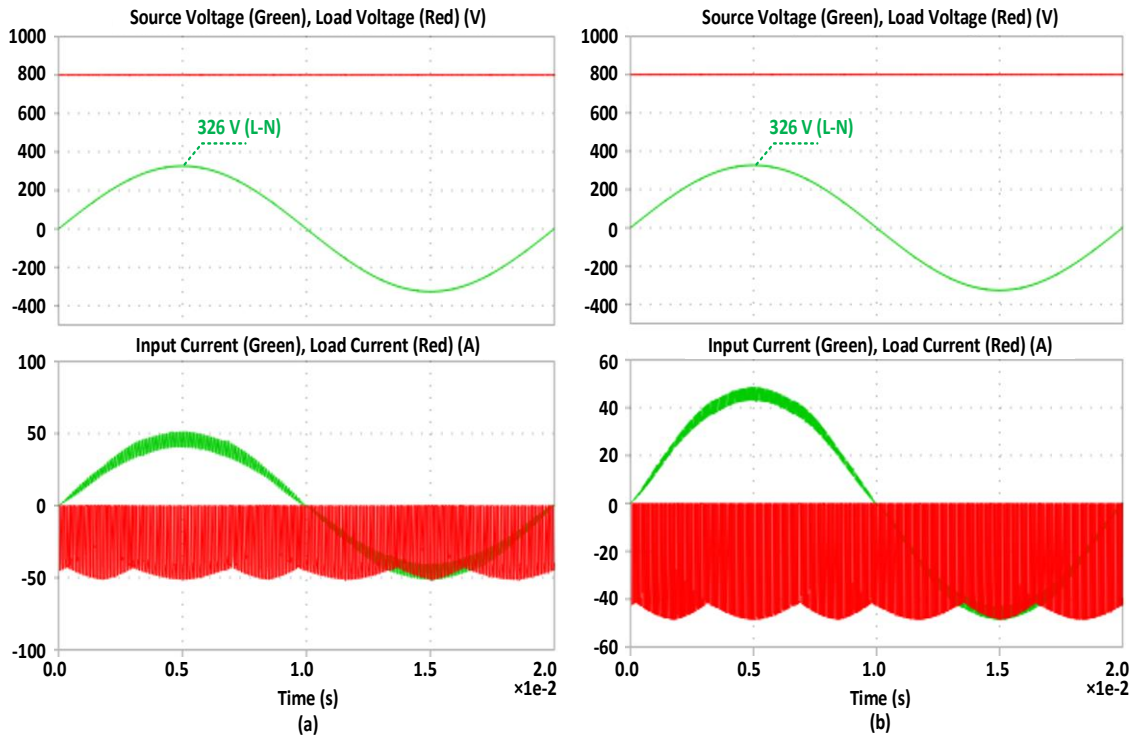


Figure 9. Performance waveforms of Vienna rectifier under (a) 10 kHz (b) 20 kHz switching frequencies

### 3. BENCHMARKING OF AFE TOPOLOGIES

In this section, the performance results and the cost metrics of the aforementioned AFEs are presented.

Table 2 presents the switching/conduction/total losses, junction temperatures and efficiency values according to the number of parallel MOSFETs under switching frequencies of 10 kHz and 20 kHz for all AFE topologies. As can be seen from the table, the junction temperatures are within the acceptable limits, the switching/conduction/total losses are low and the efficiency is very high. The effect of using parallel MOSFETs/Diodes are also examined and the results highlight that junction temperature and the losses drastically decrease, and efficiency improves. The performance results reveal that all rectifiers have approximately the same efficiency and junction temperature values. Therefore, it is essential to consider cost and cost/performance metrics as well as performance results in converter benchmarking.

Table 3 presents cost, efficiency, and cost/efficiency metrics using a 2 ohm gate resistor and 20 kHz switching frequency. In order to compare the topologies, the cost/efficiency index has been defined and the lowest index value is assumed as the most suitable topology. The calculations have been performed by considering not only the number of MOSFETs and diodes, but also the costs of the driver and the isolated power supplies required for them, and the PCB unit costs that will arise with the increase in the number of switches and drivers. As can be seen from the table, the most suitable topology alternatives are 3-phase 2-level PWM rectifier and Vienna rectifier. The 3-phase 2-level PWM rectifier excels with its 12% cost advantage, fewer components, and ease of control advantages. Although the 3-Phase 2-Level rectifier has a disadvantage in terms of total harmonic distortion, it is considered that this disadvantage can be eliminated thanks to the EMI filters to be designed at the input.

**Table 2.** Performance results of 3-phase 2-level rectifier under 10 kHz and 20 kHz switching frequencies

Topologies		Rg (Ω)	SwFrq (kHz)	Parallel MOSFETs/Diodes	Switching Loss (W)	Conduction Loss (W)	Total Loss (W)	Junction Temperature (°C)	Eff. (%)
3-Phase 2-Level Rectifier	MOSFET	2	10	1	56.03	133.27	189.30	106.4	99.16
	MOSFET			2	42.07	64.99	107.06	83.4	99.52
	MOSFET	2	20	1	118.68	137.81	256.48	117.3	98.86
	MOSFET			2	88.37	67.35	155.72	89.3	99.31
3-Phase 3-Level NPC Rectifier	MOSFET	2	10	1	16.21	290.79	331.49	127.7	98.53
	DIODE			2	0	24.49		91.5	
	MOSFET	2	20	1	34.06	293.44	351.81	128.8	98.44
	DIODE			2	0	24.31		92.1	
3-Phase 3-Level T-Type Rectifier	MOSFET	2	10	1	0	89.30	208.37	98.9	99.05
	S. MOSFET			1	15.93	109.14		109.4	
	MOSFET	2	20	1	0.01	90.95	233.87	99.8	98.96
	S. MOSFET			1	33.44	109.47		115.5	
Vienna Rectifier	MOSFET	2	10	1	14.57	109.22	221.34	109.4	99.02
	DIODE			1	0	97.55		93.2	
	MOSFET	2	20	1	30.30	109.47	237.16	114.7	98.95
	DIODE			1	0	97.39		93.8	

**Table 3.** Benchmarking of AFE topologies

Topologies	MOSFETs		Side MOSFETs		Diodes		Drivers Auxiliary Components		PCB Unit Cost	Total Costs (USD)	Eff. (%)	Cost/ Eff.
	Pcs.	Cost (USD)	Pcs.	Cost (USD)	Pcs.	Cost (USD)	Pcs.	Cost (USD)	Cost (USD)			
3-Phase 2-Level Rectifier	6	33.89	-	-	-	-	6	20	20	343.34	98.86	<b>3.473</b>
3-Phase 3-Level NPC Rectifier	12	10.55	-	-	12	4.18	12	20	40	456.76	98.44	<b>4.639</b>
3-Phase 3-Level T-Type Rectifier	6	33.89	6	10.55	-	-	12	20	40	546.64	98.96	<b>5.524</b>
Vienna Rectifier	6	10.55	-	-	6	28.75	6	20	30	385.8	98.95	<b>3.898</b>

(Cost References: www.digikey.com, Date: 10.07.2021)

#### 4. CONCLUSIONS

This paper presents the benchmarking of AFE rectifier topologies that are commonly employed in commercially available OBCs in the aspects of losses, efficiency, cost, and cost/efficiency metrics. The main objectives of AFE rectifiers are; (i) high efficiency, (ii) high power factor, and (ii) minimum input current distortion. Four different suitable AC-DC topologies in literature and among commercially available products are (i) 3-phase 2-level rectifier, (ii) 3-phase, 3-level neutral-point-clamped (NPC) rectifier, (iii) 3-phase, 3-level T-type rectifier, and (iv) Vienna rectifier. While the paper summarizes the aforementioned topologies and their advantages, it also presents performance waveforms captured on the PLECS/SpeedFit environment. In addition, the most effective topology has been determined by considering not only performance results but also the cost/efficiency index. The cost/efficiency index validates the effectiveness of the 3-Phase 2-Level and Vienna rectifiers in comparison with latter topologies. Although the two topologies stand out considering the cost/efficiency index, the 3-Phase 2-Level rectifier has a 12% cost advantage over the Vienna rectifier. The drawback of input current distortion of the 3-Phase 2-Level rectifier in comparison with the Vienna rectifier can be eliminated using an EMI filter.

#### 5. REFERENCES

1. Umar, M., Ji, X., Kirikkaleli, D., Alola, A.A., 2021. The Imperativeness of Environmental Quality in the United States Transportation Sector Amidst Biomass-fossil Energy Consumption and Growth. *Journal of Cleaner Production*, 285, 1-15.
2. Qian, Q., Sun, W., Zhang, T., Lu, S., 2017. A Voltage-fed Single-stage PFC Full-bridge Converter with Asymmetric Phase-shifted Control for Battery Chargers. *Journal of Power Electronics*, 17, 31-40.
3. Musavi, F., Edington, M., Eberle, W., Dunford, W.G., 2012. Evaluation and Efficiency Comparison of Front end AC-DC Plug-in Hybrid Charger Topologies. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 413-421.
4. Nguyen, H.V., To, D., Lee, D., 2018. Onboard Battery Chargers for Plug-in Electric Vehicles with Dual Functional Circuit for Low-voltage Battery Charging and Active Power Decoupling. *IEEE Access*, 6, 70212-70222.
5. Bayhan, S., Komurcugil, H., 2020. Sliding-Mode Control Strategy for Three-Phase Three-Level T-Type Rectifiers with DC Capacitor Voltage Balancing. *IEEE Access*, 8, 64555-64564.
6. Mallik, A., Khaligh, A., 2017. Control of a Three-Phase Boost PFC Converter Using a Single DC-Link Voltage Sensor. *IEEE*

- Transactions on Power Electronics, 32(8), 6481-6492.
7. Lee, Y., Khaligh, A., Emadi, A., 2009. Advanced Integrated Bidirectional AC/DC and DC/DC Converter for Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(8), 3970-3980.
  8. Komurcugil, H., Kukrer, O., 1998. Lyapunov-based Control for Three-phase PWM AC/DC Voltage-source Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 13(5), 801-813.
  9. Kalpana, S.P.P.R., Singh, B., Bhuvaneswari, G., 2018. Design and Implementation of Sensorless Voltage Control of Front-end Rectifier for Power Quality Improvement in Telecom System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(3), 2438-2448.
  10. Liu, B., Ren, R., Jones, E.A., Wang, F., Costinett, D., Zhang, Z., 2018. A Modulation Compensation Scheme to Reduce Input Current Distortion in GaN-based High Switching Frequency Three-phase Three-level Vienna-type Rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(1), 283-298.
  11. Zhang, B., Xie, S., Li, Z., Zhao, P., Xu, J., 2021. An Optimized Single-Stage Isolated Swiss-Type AC/DC Converter Based on Single Full-bridge with Midpoint-clamper. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(10), 11288-11297.
  12. Schrittwieser, L., Leibl, M., Haider, M., Thöny, F., Kolar, J.W., Soeiro, T.B., 2017. 99.3% Efficient Three-phase Buck-type All-SiC SWISS Rectifier for DC Distribution Systems. in 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2173-2178.
  13. Stoermer, F., Eckel, H., 2018. SiC-hybrid Three Level T-type Rectifier, in PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Power Electronics. Intelligent Motion. Renewable Energy and Energy Management, 1-6.
  14. Rodriguez, J., Bernet, S., Steimer, P.K., Lizama, I.E., 2010. A Survey on Neutral-point-clamped Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(7), 2219-2230.
  15. Kolar, J.W., Friedli, T., 2013. The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems-part I. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(1), 176-198.
  16. Yilmaz, M., Krein, P.T., 2013. Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-in Electric and Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5), 2151-2169.
  17. Friedli, T., Hartmann, M., Kolar, J.W., 2014. The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems-part II. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(2), 543-560.
  18. Aretxabaleta, I., Alegría, I. M. D., Andreu, J., Kortabarria, I., Robles, E., 2021. High-voltage Stations for Electric Vehicle Fast-charging: Trends, Standards, Charging Modes and Comparison of Unity Power-Factor Rectifiers. *IEEE Access*, 9, 102177-102194.
  19. Shi, C., Tang, Y., Khaligh, A., 2017. A Single-phase Integrated Onboard Battery Charger Using Propulsion System for Plug-in Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(12), 10899-10910.
  20. Yuan, J., Dorn-Gomba, L., Callegaro, A. D., Reimers, J., Emadi, A., 2021. A Review of Bidirectional On-board Chargers for Electric Vehicles. *IEEE Access*, 9, 51501-51518.
  21. Bor-Ren, L., Yung-Chuan, L., Tsung-Yu, Y., 2004. Implementation of a Three-phase High-power-factor Rectifier with NPC Topology. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 40(1), 180-189.
  22. Chen, J., Zhang, C., Chen, A., Xing, X., Gao, F., 2019. A Carrier-Based Fault-Tolerant Control Strategy for T-type Rectifier with Neutral-point Voltage Oscillations Suppression. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(11), 10988-11001.
  23. Mukherjee, D., Kastha, D., 2019. Voltage Sensorless Control of VIENNA Rectifier in the Input Current Oriented Reference Frame. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(8), 8079-8091.



## Calculation of Pile Capacity in Cohesionless Soil by CPT Considering Spatial Variability

Ahmet Can MERT\*<sup>1</sup> ID 0000-0002-2483-1330

Gökhan YAZICI<sup>1</sup> ID 0000-0002-6719-9152

<sup>1</sup>Istanbul Kültür University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, İstanbul

Geliş tarihi: 15.06.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: MERT, A.C., YAZICI, G., (2021). Calculation of Pile Capacity in Cohesionless Soil by CPT Considering Spatial Variability. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 1051-1059.

### Abstract

The study aims to construct a framework for CPT based ultimate pile capacity calculation for cohesionless soils with random field theory. Cone tip resistance ( $q_c$ ) was taken as the spatially varying parameter with a constant mean and changing coefficients of variation. CPT profiles were simulated with random field generations, and the ultimate capacity of a single pile ( $Q_u$ ) was calculated with these simulations. The influence of spatial variation of  $q_c$  on the variation of  $Q_u$  was investigated. The proposed framework was finally verified by comparing the results of an actual CPT database and the simulated CPT profiles in the study. The results showed that the critical vertical scale of fluctuation for CPT-based pile capacity calculations was equal to one diameter of pile ( $d_v=1D$ ), and that the method effectively predicted the ultimate pile capacity through simulated CPT profiles with random field. The proposed method is especially recommended for cases where the uncertainty consideration is necessary, yet the site-specific data is limited. The study aims to contribute a simple framework to the methods of CPT-based pile capacity with uncertainty consideration. The proposed method aims to facilitate the pile design framework with limited available data.

**Keywords:** Cone penetration test, Ultimate pile capacity, Random fields, Spatial variability, Cohesionless soil

### Kohezyonsuz Zeminde CPT ile Kazık Kapasitesinin Boşluksal Değişkenlikle Hesabı

#### Öz

Çalışma, kohezyonsuz zeminde CPT tabanlı kazık nihai taşıma kapasitesi hesabı için rastgele alan

---

\* Sorumlu yazar (Corresponding author): Ahmet Can MERT, [a.mert@iku.edu.tr](mailto:a.mert@iku.edu.tr)

teorisine dayalı bir yöntem oluşturmayı amaçlamaktadır. Koni uç direnci ( $q_c$ ), sabit alınan ortalama ve farklı değişme katsayısı (COV) değerleri ile boşluksal değişken olarak tanımlanmıştır. Rastgele alan ile CPT profilleri benzeştirilmiş ve tekil kazığın nihai kapasitesi ( $Q_u$ ) bu simule edilen profillerle hesaplanmıştır.  $q_c$ 'deki değişimin  $Q_u$  değerlerine etkisi incelenmiştir. Önerilen yöntem son olarak, gerçek CPT veri tabanı ile ve simule CPT profilleri ile hesaplanan sonuçların karşılaştırılması ile doğrulanmıştır. Edinilen sonuçlar CPT tabanlı kazık kapasite hesaplarında, düşey dalgalanma ölçeğinin kritik değerinin bir kazık çapı kadar olduğunu ( $d_v=1D$ ), ve yöntemin nihai kazık kapasitesini rastgele alan ile etkili bir şekilde tahmin ettiğini göstermiştir. Doğrulan yöntem özellikle belirsizlik hesabı yapılması gerekli olan ancak yeterli sahaya özel verinin bulunmadığı durumlar için önerilmektedir. Çalışmanın literatüre, CPT tabanlı kazık kapasitesi yöntemlerine pratik bir çerçeve ile belirsizlik analizi eklemeyerek katkı sağlaması amaçlanmaktadır. Ayrıca önerilen yöntemin, kısıtlı veri bulunması durumlarında kazık tasarımını kolaylaştırması hedeflenmiştir.

**Keywords:** Koni penetrasyon deneyi, Kazık nihai kapasitesi, Rastgele alanlar, Boşluksal değişkenlik, Kohezyonsuz zemin

## 1. INTRODUCTION

Piled foundations are one of the common solutions in geotechnical engineering. The bearing capacity of a single pile is the main parameter for analysis and design purposes. Even for design of a pile group, single pile capacity is required. Since the pile capacity is one of the main parameters for geotechnical design, estimation of the pile capacity should also include the uncertainty of soil conditions. These uncertainties may arise due to inherent soil variability, measurement errors and soil-structure interaction [1-3]. The use of in-situ test results to calculate pile capacity is a common approach since the data from the test covers most of the soil conditions including their uncertainties (i.e. initial stress conditions, water conditions). Among the in-situ methods, cone penetration test (CPT) based approach is one of the commonly used in engineering practice, because the CPT is a simple and an economical method to provide representative site information in field conditions [4,5]. Furthermore, the mechanics of the test and the pile capacity are analogous. Therefore, most of the CPT based pile capacity methods directly use the cone tip resistance ( $q_c$ ) data.

There have been many developments in the prediction of the ultimate pile capacity with CPT [6-8]. In addition to the methods proposed by

researchers, many standards also include the CPT based pile capacity approach. For example, French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks uses the so-called LCPC method proposed by Bustamante and Gianesselli [9]. The method uses the direct use of  $q_c$  to predict the ultimate pile capacity. Although CPT based pile capacity methods offer high accuracy in estimation, the prediction of the ultimate capacity of single pile may still result in various errors due to the existence of transformation uncertainty, measurement errors and inherent soil variability [10,11]. Therefore, the estimation of ultimate capacity of monopiles in cohesionless soil (i.e., sand and silty sand) may fluctuate due to the spatial variation of soil material and uncertain geological conditions. Thus, these sources of uncertainties need to be considered for a better prediction of the ultimate pile capacity.

There are recent studies on the uncertainty in pile capacity [12], some of which consider the spatial variation of CPT or random field theory [13,14]. The present study aims to construct a framework for CPT based ultimate pile capacity calculation by considering spatial variability of cone tip resistance. The spatially variable  $q_c$  was generated by using random field theory to calculate ultimate pile capacity of an example design. The influence of spatial variation of cone tip resistance on the

variation of ultimate pile capacity was investigated. The proposed framework was finally verified by comparing the results of an actual CPT database and the generated random fields in the study. The proposed method is especially recommended for cases where the uncertainty consideration is necessary, yet the site-specific data is limited. The study aims to contribute a simple framework to the methods of CPT-based pile capacity with uncertainty consideration. The proposed method aims to facilitate the pile design framework with limited available data.

## 2. CPT BASED ULTIMATE PILE CAPACITY

One of the most used CPT based pile capacity method in geotechnical engineering practice was employed in this study. The method is called the French method (or LCPC method) after the approach became a standard method in French Road and Transportation Research Laboratory (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) [9]. The LCPC method determines the maximum pressure at pile base  $q_p$  as follows (Equation 1):

$$q_p = \alpha_p \cdot q_{c,eq} \quad \# \quad (1)$$

where  $\alpha_p$  pile base coefficient,  $q_{c,eq}$  equivalent average cone tip resistance which is calculated by averaging  $q_c$  values over a zone ranging from 1.5D below the pile tip to 1.5D above the pile tip (D is the pile diameter).

The maximum shaft friction  $q_s$  is given by Equation 2:

$$q_s = \alpha_s \cdot q_{c,z} \quad \# \quad (2)$$

where  $\alpha_s$  shaft friction coefficient  $q_{c,z}$  tip resistance along pile shaft. Pile base and shaft friction coefficients are taken from the chart (Table 1 and 2). Base pressure and shaft friction are used to calculate the ultimate pile bearing capacity  $Q_u$  for the given pile length (L) and pile diameter (Equation 3):

$$Q_u = Q_s + Q_p = \pi DLq_s + \frac{\pi D^2}{4} q_p \quad \# \quad (3)$$

The range of cohesionless soils were employed for the bored pile type in Table 1 and 2, and all the pile capacity calculation in the study were performed by using equation 3.

**Table 1.** Pile base coefficients

Soil Type	$q_c$ (MPa)	$a_p$
Clay	$q_c \leq 1$	0.04
	$1 < q_c < 5$	0.35
	$5 \leq q_c$	0.45
Sand	$q_c < 12$	0.40
	$12 \leq q_c$	0.30

Shaft friction has a limit and the minimum value from the chart should be used.

**Table 2.** Shaft friction coefficient

Soil Type	$q_c$ (MPa)	$a_s$	Max. Shaft resistance (kPa)
Clay	$q_c \leq 1$	0.033	15
	$1 < q_c < 5$	0.025	35
	$5 \leq q_c$	0.017	35
Sand	$q_c \leq 5$	0.010	35
	$5 < q_c < 12$	0.010	80
	$12 \leq q_c$	0.007	120

## 3. MECHANICAL PROPERTIES AND MODELLING

### 3.1. Random Field Theory

Spatial variation of the mechanical properties of soil significantly complicates the reliability assessment. In this study, random field theory was

utilized to carry out the reliability assessment of CPT based ultimate pile capacity calculation. The theory, which accounts for the variation of any random variable in space, is an efficient for uncertainty in one, two or three-dimensional spatial variation of mechanical properties [15]. The proposed method requires definition of random field for spatially varying parameter by a correlation function  $r(t)$ . The parameter  $t$  is the distance between random variables in the field. The correlation function also includes the main parameter for random field, which is called scale of fluctuation ( $d$ ), and is given for an exponential Markovian type as Equation 4:

$$\rho(\tau) = \exp\left(-\frac{2|\tau|}{\delta}\right) \quad (4)$$

The present study modelled the cone tip resistance ( $q_c$ ) as a Gaussian random field with exponential correlation given in Equation 4.

### 3.2. Spatial Variability of CPT

Cone tip resistance ( $q_c$ ) was defined as a spatially varying parameter for ultimate pile capacity calculation. The variation was modelled by a one-dimensional Gaussian random field along the depth. Mean ( $m$ ) and coefficient of variation (COV) are required for the definition of the field along with scale of fluctuation ( $d$ ) which is the main parameter. An extensive study reported that the range of  $q_c$  in cohesionless soils varied between 0.4-29.2 MPa with COV of 10-80%. They also suggested that the vertical scale of fluctuation ( $d_v$ ) for  $q_c$  varied between 0.1 to 2.2 meters [1]. All the values for variability have been employed within these limits.

### 3.3. Pile Geometry and Random Field Generation

A single pile was selected with 8m in length ( $L$ )

and 0.6 m in diameter ( $D$ ). All the ultimate pile capacity calculations were performed by using the given geometry.

The variability of  $q_c$  can be represented as a lognormal random field described by mean ( $m_{q_c}$ ),  $COV_{q_c}$ , and vertical scale of fluctuation [15-17]. Lognormal distribution prevents the negative values and has been shown to be effective in simulating spatial variability of  $q_c$  [1,18]. Hence,  $m_{q_c}$  was taken as 15 MPa and the parameter was assumed to be lognormally distributed.  $COV_{q_c}$  was selected 10, 20, 40 and 80% which conformed the suggested range. Vertical scale of fluctuation was taken as the multiples of the pile diameter; 0.5D, 1D, 2D and 4D which varied between 0.3 to 2.4 m. One-dimensional random field of  $q_c$  was generated by MATLAB code with the given mean, COVs and  $d_v$ . The realizations were generated for every 2cm along the depth of 15m which is the common sampling rate of CPT. For each  $d_v$  value, 4 different random field were generated for each  $COV_{q_c}$ . Each generation contained 1000 realizations, which made 4000 realizations for each  $d_v$  and total 16000 realizations. Figure 1 shows some of the representative realizations of the generated CPT profiles by random field for each scale of fluctuation.

### 3.4. Methodology

The study aims to present the effect of  $q_c$  variation in ultimate pile capacity ( $Q_u$ ). Initially, spatial variation of  $q_c$  was defined as random field by MATLAB code. Each realization represented an arbitrary CPT profile for the given statistics. Therefore, all the generated profiles were employed to calculate ultimate pile capacity by LCPC method. Output capacities were recorded to obtain probability density functions (PDF). Finally, statistical information of the output PDFs was presented and the effect of  $q_c$  variation on the ultimate pile capacity was investigated. Figure 2 presents the main framework of the proposed method.

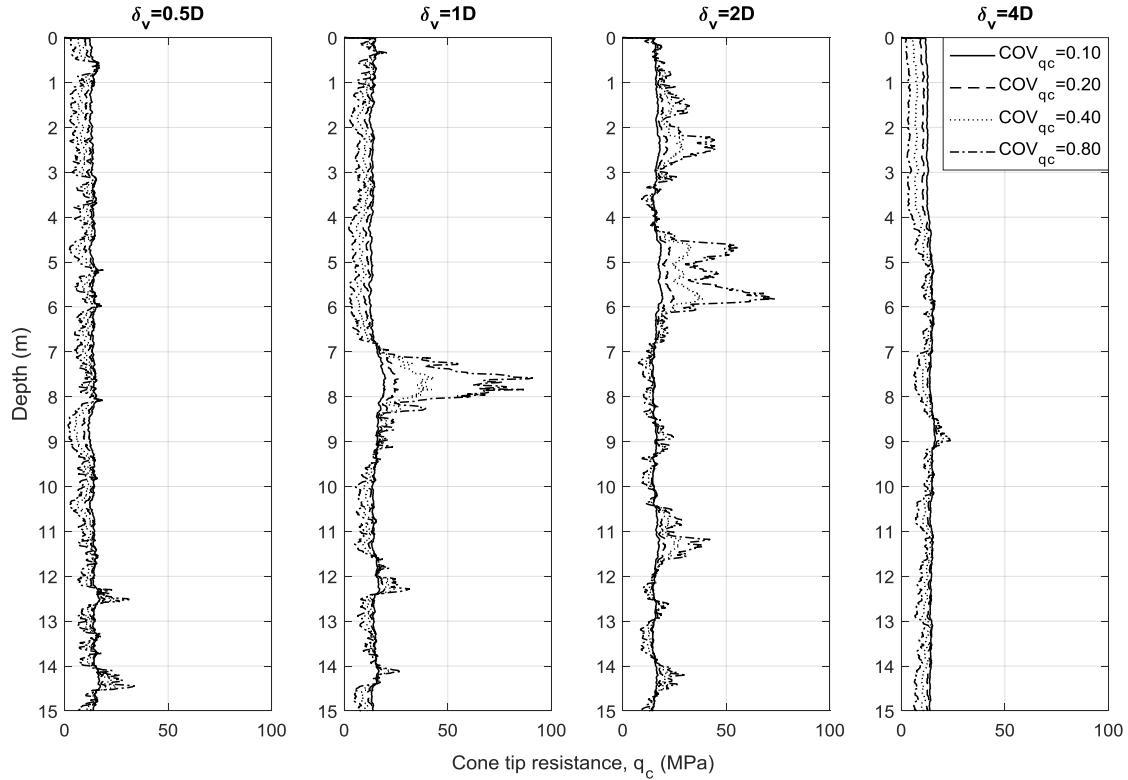


Figure 1. Representation of generated CPT profiles

#### 4. VERIFICATION OF THE PROPOSED METHOD

The method proposed in the present study can be used for the cases when there is known uncertainty measures in a region with limited data available. The statistical parameters from the site can be assigned into the first step of the flow chart in figure 2, and the random field of CPT profiles can subsequently be generated in order to perform reliability assessment of the ultimate pile capacity. A sample CPT database from ISSMGE technical committee TC304 for engineering practice of risk assessment and management was employed to verify the proposed method.

(<https://www.issmge.org/committees/technical-committees/impact-on-society/risk>). The database has 25 CPT profiles with total depths of 13 to 13.5 m. The test site is located in Hollywood, South

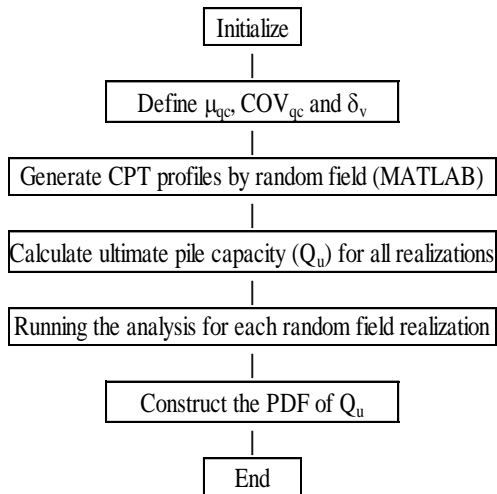


Figure 2. Flowchart of the proposed method

Carolina, USA and beach sand and silty sand are predominant in the region. It has been reported that  $d_v$  for the database is approximately 0.5 m [19]. Mean  $q_{cs}$  are varying between 4.07 to 6.23 MPa with  $COV_{q_c} = 50.2-107.5\%$ . The statistical information was employed to generate CPT profiles by random field as described in the proposed methodology. CPT profiles from the database and the simulated profiles for the given

statistical parameters were compared (Figure 3). The ultimate pile capacity were calculated by LCPC method by using both CPT database and simulated data. Ultimate capacities calculated from database ( $Q_c$ ) and random field generation ( $Q_{rf}$ ) were compared, and the regression of the results showed that the proposed method gave a reliable prediction of the pile response with  $R^2=0.96$  (Figure 4).

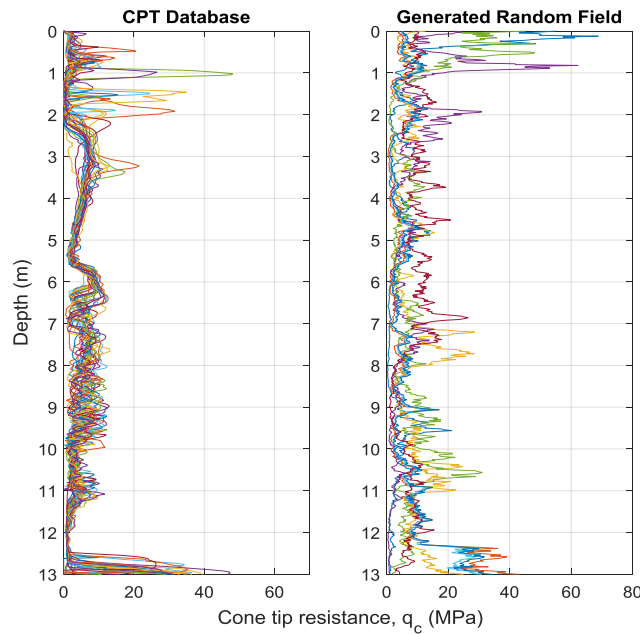


Figure 3. Actual and simulated CPT profiles of the database

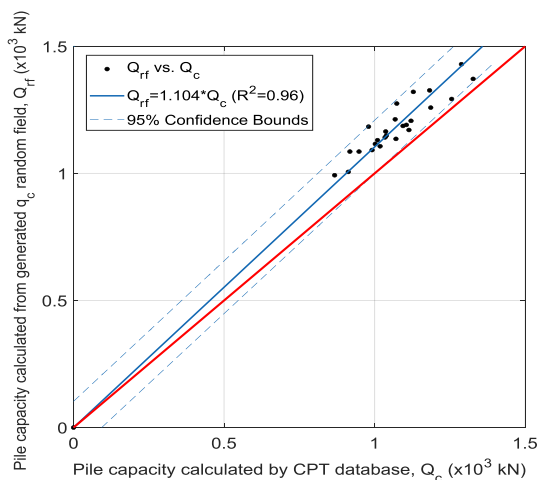


Figure 4. Ultimate pile capacity comparison

$Q_{rf}$  slightly overestimated the ultimate pile capacity comparing to the actual results, but the values were still within the 95% confidence bounds, which validated the proposed method. The further analyses were conducted by using the validated framework.

## 5. RESULTS

Analyses performed with the generated random fields for the selected  $m_{q_c}$ ,  $COV_{q_c}$  and  $d_v$ . The effect of variability and vertical scale of fluctuation of  $q_c$  on the variation of  $Q_u$  was investigated. Variation of output PDFs were represented by  $COV_{Q_u}$ , and the values were plotted against  $COV_{q_c}$  and  $d_v$  (Figure 5 and 6).

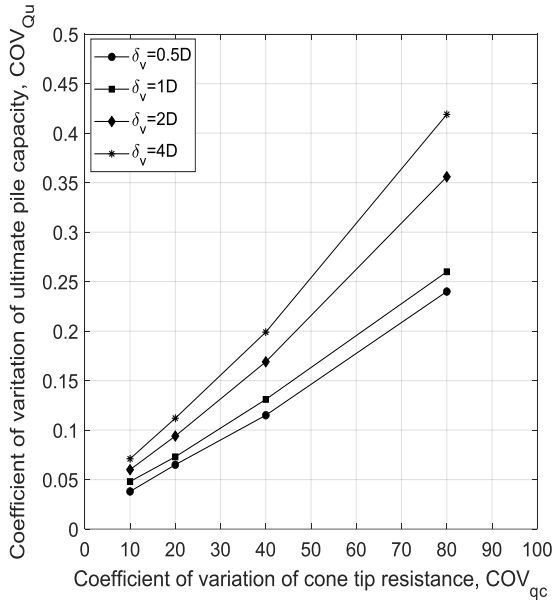


Figure 5.  $COV_{Q_u}$  versus  $COV_{q_c}$  plot

It was shown that variation of  $Q_u$  is increasing as the variation of  $q_c$  increases which suggests the consideration of uncertainty.

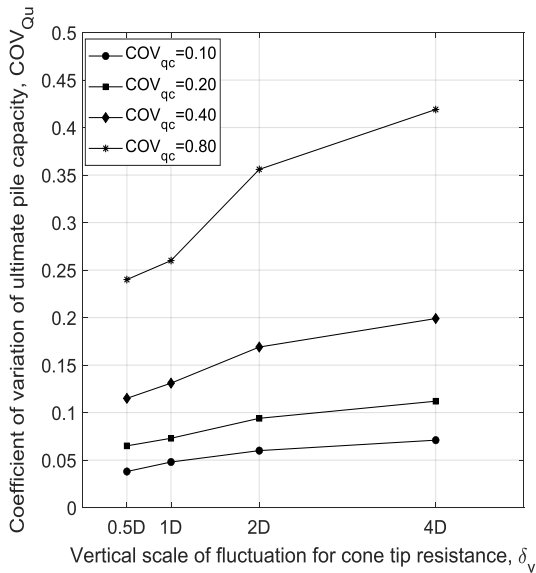


Figure 6. The influence of  $d_v$  on  $COV_{Q_u}$

Results showed that the pile capacity considerably

varied with high variation of tip resistance confirming the significance of uncertainty assessment.

There was a slight increase for  $COV_{Q_u}$  for increasing scale of fluctuation, especially for  $COV_{q_c} < 40\%$  since the variation of tip resistance became tolerable for pile capacity beyond that limit. Increase in  $d_v$  provides higher possibility to assign low properties over a larger region, which results in the higher changes of the output variations. Therefore, the critical value of  $d_v$  should be considered for the specific desing purposes. The influence of change in input parameter on the mean of ultimate pile capacity ( $m_{Q_u}$ ) was also investigated. Figure 7 and 8 depicts the effects of  $COV_{q_c}$  and  $d_v$  on  $COV_{Q_u}$ , respectively.

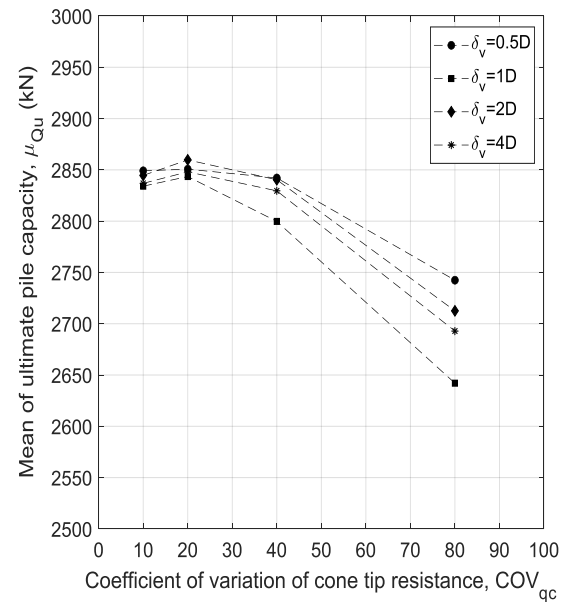


Figure 7. Effect of  $COV_{q_c}$  on  $\mu_{Q_u}$

There was obvious decrease in  $m_{Q_u}$  for increasing  $COV_{q_c}$ , particularly after 20% and greater. It can be explained as the effect of  $COV_{q_c}$  in the shape of output distribution of  $Q_u$ . After 20% change the variation became dominant and the mean value of  $Q_u$  decreased. Mean of pile capacity was slightly increasing for  $d_v$  which is equal to the pile diameter.



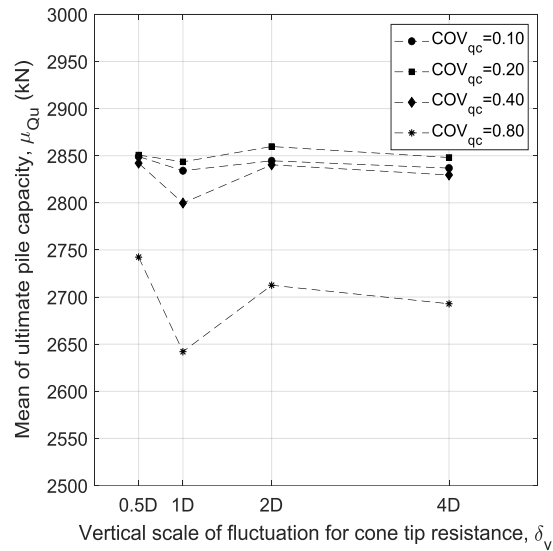


Figure 8.  $d_v$  versus  $m_{Q_u}$  plot

It was clearly seen from figure 8 that the mean values were significantly varying for  $COV_{qc}=80\%$ . There was a slight variation of mean values for changing scale of fluctuations except for  $d_v=1D$  case, which suggested that the critical value of the vertical scale of fluctuation for pile capacity problems were one diameter. The results also showed the necessity of reliability assessment for pile design and analysis even for in-situ based methods.

## 6. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The results of the study showed the necessity of spatial variability of CPT for reliability assessment of single pile in cohesionless soil. The change in  $COV_{qc}$  and  $d_v$  obviously affected the variation of  $Q_u$ . It can be concluded that the pile capacity considerably varied with high variation of tip resistance confirming the significance of uncertainty assessment. Mean value of ultimate pile capacity was slightly influenced by  $d_v$ . However, the essential finding must be emphasized that the critical vertical scale of fluctuation for CPT-based pile capacity calculations was equal to one diameter of pile ( $d_v=1D$ ). Therefore, the consideration of critical

value of  $d_v$  for the specific pile desing purposes is recommended. The proposed method effectively predicted the ultimate pile capacity by simulated CPT profiles by random field. The method offers a reliability assessment opportunity for in-situ based pile design and analysis when the uncertainty needs to be taken into consideration with limited available data. The propesed method efficiently facilitated the pile design framework with limited in-situ data.

## 7. REFERENCES

1. Phoon, K.K., Kulhawy, F.H., 1999. Characterization of Geotechnical Variability. Canadian Geotechnical Journal, 36(4), 612-624.
2. Ghorbani, B., Sadrossadat, E., Bazaz, J.B., Oskooei, P.R., 2018. Numerical ANFIS-based Formulation for Prediction of the Ultimate Axial Load Bearing Capacity of Piles Through CPT Data. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 36(4), 2057-2076.
3. Padmini, D., Ilamparuthi, K., Sudheer, K.P., 2007. Ultimate Bearing Capacity Prediction of Shallow Foundations on Cohesionless Soils Using Neurofuzzy Models. Computers and Geotechnics, 35(1), 33-46.
4. Valikhah, F., Eslami, A., Veiskarami, M., 2019. Load-displacement Behavior of Driven Piles in Sand Using CPT-based Stress and Strain Fields. International Journal of Civil Engineering, 17(12), 1879-1893.
5. Wang, C.H., Osorio-Murillo, C.A., Zhu, H.H., Rubin, Y., 2017. Bayesian Approach Calibrating Transformation Model from Spatially Varied CPT Data to Regular Geotechnical Parameter. Computers and Geotechnics, 85, 262-273.
6. Tumay, M.T., Fakhroo, M., 1981. Pile Capacity in Soft Clays Using Electric QCPT Data. In: Proceedings of a Conference on Cone Penetration Testing and Experience. (St Louis), 434-455.
7. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Davies, M.G., Sy, A., 1988. Axial Capacity of Driven Piles in Detail Soils Using CPT. Proceeding of

- International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando. Balkema Pub., Rotterdam, 2, 919-928.
8. Eslami, A., Fellenius, B.H., 1997. Pile Capacity by Direct CPT and CPTu Methods Applied to 102 Case Histories. Canadian Geotechnical Journal, 34(6), 886-994.
  9. Bustamante, M., Gianceselli L., 1982. Pile Bearing Capacity Prediction by Means of Static Penetrometer CPT. Proceedings of 2<sup>nd</sup> European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, 493-500.
  10. Phoon, K.K., Kulhawy, F.H., 1999. Evaluation of Geotechnical Property Variability. Canadian Geotechnical Journal, 36(4), 625-639.
  11. Beck, J.L., Au, S.K., 2002. Bayesian Updating of Structural Models and Reliability Using Markov Chain Monte Carlo Simulation. Journal of Engineering Mechanics, 128(4), 380-391.
  12. Xu, D., Liu, Z., Chen, B., Xu, X., 2020. Bearing Capacity Analysis of Offshore Pipe Piles with CPTs by Considering Uncertainty. Computers and Geotechnics, 126, 103731.
  13. Baker, J.W., Faber, M.H., 2008. Liquefaction Risk Assessment Using Geostatistics to Account for Soil Spatial Variability. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134, 14-23.
  14. Cai, Y., Bransby, F., Gaudin, C., Uzielli, M., 2021. A Framework for the Design of Vertically Loaded Piles in Spatially Variable Soil. Computers and Geotechnics, 134, 104140.
  15. Vanmarcke, E., 2010. Random Fields: Analysis and Synthesis. World Scientific, New Jersey, USA.
  16. Fenton, G.A., Griffiths, D.V., 2008. Risk Assessment in Geotechnical Engineering. Wiley, New York, USA.
  17. Cai, Y., Li, J., Li, X., Li, D., Zhang, L., 2019. Estimating Soil Resistance at Unsourced Locations Based on Limited CPT Data. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78(5), 3637-3648.
  18. Uzielli, M., Lacasse, S., Nadim, F., Phoon, K.K., 2007. Soil Variability Analysis for Geotechnical Practice. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils (eds Tan, T.S., Phoon, K.K., Hight D.W., Leroueil, S.), The Netherlands: Taylor and Francis, Singapore, 1653-1752.
  19. Bong, T., Stuedlein, A.W., 2017. Spatial Variability of CPT Parameters and Silty Fines in Liquefiable Beach Sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143(12), 04017093.



## Improving the Breaking and Tear Strength of Cotton Fabric Using BTCA and CA Crosslinkers

Aslıhan KORUYUCU\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-8443-5188

<sup>1</sup>Namık Kemal University, Çorlu Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Tekirdağ

Geliş tarihi: 24.05.2021 Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: KORUYUCU, A., (2021). BTCA ve CA Çapraz Bağlayıcılar Kullanılarak Pamuklu Kumaşın Kopma ve Yırtılma Mukavemetinin Geliştirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 1061-1072.

### Abstract

Polycarboxylic acids are used as crosslinking agents with sodium hypophosphite which do not contain formaldehyde. In this study, breaking strength, breaking elongation and tear strength of cotton(twill weave)fabric samples were determined by using twill fabrics, six different coating recipes, produced with 100% cotton yarns. The results of breaking strength, breaking elongation and tear strength testing were compared according to the fabric structure, coating recipes and crosslinker structure statistically. A significant increase in tensile strength was observed after coating with 1g Cu<sub>2</sub>O<5 µm, CuO<5 µm, ZnO<5 µm and 5 g 1,2,3,4-BTCA. The high number of warp threads per unit length in cotton woven fabric leads to an increase in tensile strength. The best results in tensile strength and elongation at break experiments were obtained after the reaction of polyacrylate binder with BTCA and ZnO microparticles.

**Keywords:** Woven fabric, Breaking and Tearing strength, Breaking elongation, Coating recipes, Crosslinker structure

### BTCA ve CA Çapraz Bağlayıcılar Kullanılarak Pamuklu Kumaşın Kopma ve Yırtılma Mukavemetinin Geliştirilmesi

### Öz

Polikarboksilik asitler, sodyum hipofosfit ile formaldehit içermeyen çapraz bağlayıcı maddeleri olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, %100 pamuk dimi yapısında kumaşlar kullanılarak altı farklı kaplama reçetesi ile kumaşın kopma, uzama ve yırtılma mukavemetleri belirlenmiştir. Kullanılan kumaş cinsine, kaplama reçetesine ve çapraz bağlayıcı yapısına göre elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. 1 g Cu<sub>2</sub>O<5 µm, CuO<5 µm, ZnO<5 µm ve 5 g 1,2,3,4-BTCA ile kaplamadan sonra kopma mukavemetinde önemli bir artış gözlenmiştir. Pamuklu dokuma kumaşta birim uzunluktaki

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Aslıhan KORUYUCU, [adelituna@nku.edu.tr](mailto:adelituna@nku.edu.tr)

çözgü iplik sayısının fazla olması, çekme mukavemetinin artışına yol açmaktadır. Kopma mukavemeti ve kopma uzamasında en iyi sonuç; poliakrilat binderin BTCA ve ZnO mikro partikülü ile reaksiyonu sonrasında elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dokuma kumaş, Kopma ve Yırtılma mukavemeti, Kopma uzaması, Kaplama reçetesi, Çapraz bağlayıcı yapısı

## 1. INTRODUCTION

Surface coating of textile materials with chemical constructions have been developed permanently for several most recent decades. The essential substrate of the surface material is mainly textile fabric and it is coated on one or both surfaces with one or more polymer layers. These kind of products with the essential textile material have numerous improved properties and various advantages over the classic textile material [1-3].

Cotton has inadequate increased resistance owing to its free hydroxyl groups. To improve the crease cure property of cotton, the free hydroxyl groups are cross-linked by applying general aldehyde and non-general aldehyde based crosslinking agents.

The applied polymer layer can be polyacrylate. Acrylate polymers are the group of polymers which could be mentioned to plastics and frequently known as acrylics or polyacrylates. They are defined by their transparency and elasticity [1,2]. Acrylic polymers display different properties depending on their chain length, their degree of crosslinking and the nature of crosslinking agent used. Linear acrylic polymers with short chain length are water soluble and they are used for their metal quenching properties.

Acrylates are the esters, salts and conjugate bases of acrylic acid with its derivatives. They are made from acrylate monomer, which commonly consists of esters which includes vinyl groups, that is two carbon atoms that are double-bonded to each other, and straight attached to the carbonyl carbon of the ester group.

Butyl acrylate derivatives could be used to improve the impact strength of breaking, elongation and tearing [4-7].

Acrylates are used for many applications, such as mainly in cosmetics, adhesives, textile, paints, and biomedical applications. However, acrylate polymers suffer some disadvantages such as low mechanical properties at ambient or high temperatures, particularly above their glass transition temperature. They are used not only coating, but also printing purposes [3,8].

When the polycarboxylic acid crosslinks with cellulose, after that an anhydride ring is esterified with a hydroxyl group of cellulose, and the non-esterified carboxyl group remains.

BTCA satisfies many desirable requirements such as durable press performance. However, it results more loss in tensile strength and abrasion resistance [9].

Tensile strength loss is attributed to acid catalyzed depolymerization and cellulosic crosslinking [9], whereas abrasion resistance loss is associated with irreversible acid catalyzed depolymerization and reversible crosslinking of cellulose molecules[10]. Polymer additives have been used mainly in conventional cotton crosslinking to improve wrinkle properties [11,12], abrasion resistance [13], tear strength [14], as well as to inhibit uneven crosslink distribution during drying of cotton textiles i.e. to inhibit migration [15].

The loss of tensile strength of 1,2,3,4-butantetracarboxylic acid (BTCA) treated cotton was found to be caused by acid degradation and crosslinking. [16]. Pre-cationization of the cotton fabric with an ammonium citrate and sodium hypophosphite, followed by ionic crosslinking, results in a slightly better tensile strength [25].

Since twill fabrics have a slight loose structure, the yarns slip over each other at the time of tearing, stretch and tear later [26].

## 2. REVIEW OF LITERATURE

There are some research works, where different types of crosslinking agents are used in cotton fabric strength. Yang et al. [17] have studied the relationship between fabric tensile strength loss and the molecular structures of crosslinking agents. Yang et al. also compared that the tensile strength loss of cotton treated with DMDHEU and DDMI.

Refaie. [18] has studied that the addition of CMC alone or in combination with chitosan (0.5%) to BTCA finishing improved crease recovery angle, tensile strength, abrasion resistance. Chen [19] investigated that the cause and mechanism of loss in abrasion resistance of cross-linked cotton fabrics. And also developed that the relationship between the molecular structure of cross-linking agents and the mechanical properties of cross-linked textile structures. Weilin Xu et al [20-22] performed a treatment on cotton fabrics at different curing temperatures with different concentrations of 1,2,3,4-butanetetracarboxylic acid (BTCA) catalyzed with sodium hypophosphite (SHP). Strength retention and wrinkle recovery angle (WRA) were tested and the results declared that high curing temperature and high BTCA concentration reduced fabric strength. Weilin Xu [23] made a treatment on cotton fibers and their fabric with BTCA with the catalyst SHP at different concentrations of treating agent and different curing temperatures. Results showed that low curing temperatures and low agent concentrations have a slight effect on the reduction of crystallinity and crystallite size. Initial slight crystallinity loss induced high strength loss in the fabric. Spencer [24] made a treatment on 100% plain weave cotton fabric which has been scoured, desized, bleached, and heat set.

The optimal treatment involved carboxy methylation in two steps. The optimal treatment was to provide the largest increase in dry WRA, the largest increase in wet WRA, the best DP rating and moderate increases in

strength and elongation.

In this study, the  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$  and  $\text{ZnO}$  microparticles and 1,2,3,4-butanetetracarboxylic acid (BTCA), citric acid monohydrate (CA) and sodium hypophosphite (SHP) were used as crosslinking agents to improve the mechanical properties of cotton fabrics.

## 3. MATERIALS AND METHODS

### 3.1. Materials

100% cotton fabric was used for this study which was selected due to its wide usage in denim shirt fabric.

The substrates were characterised with respect to their weight and thickness, the data of which is shown in Table 1.

The cotton fabric had a twill weave, with a unit weight of  $336.79 \text{ g/m}^2$ , and a thickness of  $0.4545 \text{ mm}$ . Copper (I) oxide, copper (II) oxide and zinc oxide particles below  $5 \text{ }\mu\text{m}$  (Sigma Aldrich) pattern were used as supplied.

### Cross-linkings

At high temperatures, carboxylic acids generate ester-type crosslinking with cellulose molecules and provide mechanical performance. For this purpose, BTCA and CA were used in this study. Since these two carboxylic acids make effective cross-linking in the combined use of phosphorous-including acids with inorganic salts, SHP was added as a catalyst in pre-treatment bath. The composition of pre-treatment baths including BTCA and SHP, and CA and SHP were indicated in Table 1.

Properties of commercial samples were given in Table 2. As the thickener, anionic polyacrylate polymer dispersion was used. Density of the thickener was  $1.1 \text{ g/cm}^3$  at  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  and the pH was 6.

**Table 1.** Composition of pre-treatment baths

Treatments	BTCA, gram	CA, gram	SHP, gram	Pure water, ml
2,5%BTCA +1%SHP	30	-	12	1000
2,5%CA +1%SHP	-	30	12	1000

The commercially conventional polyacrylate polymers were supplied from CHT. Tubicoat A41 and A17 are water based acrylate binders, Ruco-coat TH 5020 are a acrylate synthetic thickener from Rudolf-Duraner. The coating was applied by laboratory type blade coating machine (Ataç Machine Corp, RKL40). The coating density was applied by working at one blade distance (0.1 mm).

The coated fabrics were dried at 100 °C for 2 min and then cured at 160 °C for 2 min.

In this study, cotton woven fabrics coating with BTCA-sodium hypofosfite.

**Table 2.** Commercial samples

Fabric Code	Particle/crosslinking structure/coating thickness (mm)
PA 1a	Cu(I)O<5 µm+1,2,3,4-butantetracarboxylic acid/0.1 mm
PA 2a	Cu(II)O<5 µm+1,2,3,4-butantetracarboxylic acid/0.1 mm
PA 3a	ZnO<5 µm+1,2,3,4-butantetracarboxylic acid/0.1 mm
PA 1b	Cu(I)O<5 µm+citric acid monohydrate/0.1 mm
PA 2b	Cu(II)O<5 µm+ citric acid monohydrate/0.1 mm
PA 3b	ZnO<5 µm+ citric acid monohydrate/0.1 mm

PA 1a sample which was treated with Cu(I)O<5 µm via 1,2,3,4-butan tetracarboxylic acid crosslinking with 0.1 mm coating thickness polyacrylate binder.

PA 2a sample which was treated with Cu(II)O<5 µm via 1,2,3,4-butan tetracarboxylic acid crosslinking with 0.1 mm coating thickness polyacrylate binder.

PA 3a sample which was treated with ZnO<5 µm via 1,2,3,4-butan tetracarboxylic acid crosslinking with 0.1 mm coating thickness polyacrylate binder.

PA1b sample which was treated with Cu(I)O<5 µm via citric acid monohydrate crosslinking with 0.1 mm coating thickness polyacrylate binder.

PA2b sample which was treated with Cu(II)O<5 µm via citric acid monohydrate crosslinking with 0.1 mm coating thickness polyacrylate binder.

PA3b sample which was treated with ZnO<5 µm via citric acid monohydrate crosslinking with 0.1 mm coating thickness polyacrylate binder.

### 3.2. Mechanical Performance Tests

ISO test methods 13937-1, 13934-2 and 12947-3; 12947-4 were used for tear strength, breaking strength and Martindale abrasion fabric testing. All fabrics were taken into consideration in the warp and weft directions.

The tear resistance of fabrics are attributed by different methods of sample preparation, their shape and size [5].

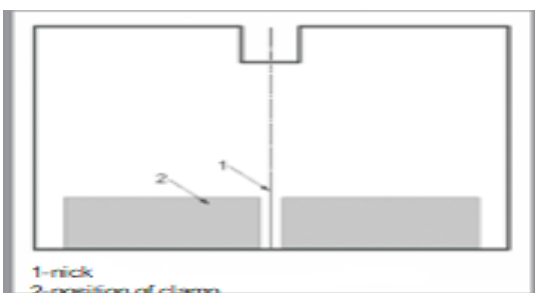
Tear strength properties (warp and weft direction) were measured by using ballistic pendulum method (Elmendorf) according to PN-EN ISO 13937-1:2000 standard. In Figure 1, the Elmatear model 455 for the dynamic tear test was presented.

The method of sample preparation and the initial length between jaws was kept at 20±0.5 mm and the tear distance is 43±0.5 mm as shown in Figure 2.





**Figure 1.** Elmatear device



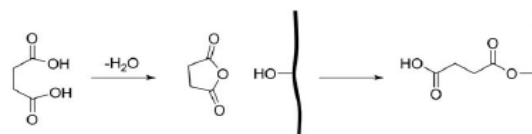
**Figure 2.** Method of sample preparation and the initial length in the Elmatear according to PN-EN ISO 13937-1:2002

### 3.2.1. Breaking Test Results

Cotton fabrics coated with a polyacrylate binder were subjected to physical tests to maintain their resistance to mechanical stress. The general purpose of the analysis was to indicate distribution of maximum principal stress, loss in weight and obtain the tensile strength.

The loss of tensile strength obtained with polycarboxylic acid crosslinking was attributed to the inflexibility of the crosslinking itself, as well as the uneven heating in the curing step [27].

Carboxylic groups on BTCA react with the hydroxyl groups on cellulose to form ester bonds (Figure 3).



**Figure 3.** Formation of ester linkages between poly carboxylic acid and hydroxyl groups on cellulose

In this respect, the acids that have been studied usually have the smallest three carboxylic or two groups which were required to form each cyclic anhydride. Examples include 1,2,3,4-butantetracarboxylic acid (BTCA) [25-33].

Polycarboxylic acids have to form an anhydride intermediates esterify cotton cellulose [30].

1,2,3,4-butantetracarboxylic acid (BTCA) and citric acid monohydrate (CA) work as cotton crosslinkers by covalently bonding to cellulose fibers [29].

Finally, pre-cationization of the fabric with an ammonium reagent, followed by ionic crosslinking, has also been shown to improved tensile strength [34].

In order to determine the effects of coating parameters, the breaking and tear strength test results were evaluated. Breaking strength and extension values of raw cotton fabrics coated with soft polyacrylate binders are given in Table 3 [6,7].

**Table 3.** Comparison of breaking strength and extension test results

	Breaking Strength (N)		Extension (mm)	
	Weft	Warp	Weft	Warp
Uncoated	205.8	491.3	12	14.86
BTCA+ ZnO	796.4	826.9	14.96	25.61
CA+ ZnO	445.9	786.1	16.55	26.69
BTCA Cu(I)O	510.8	794.6	14.25	27.24
CA+ Cu(I)O	256.3	735.2	44.33	15.36
BTCA+ Cu(II)O	605.2	780.8	13.88	26.37
CA+ Cu(II)O	444.5	776.7	14.40	26.63

A major increase in breaking force in both warp and weft directions were obtained when compared to those of uncoated fabrics. Example breaking test plots from warp direction testing (which means weft yarns were broken) were shown in Figure 4.

As a consequence, the uncoated samples in the breaking load test caused less bending than to the coated samples.

Coating application increased the breaking load considerably. As shown in Figure 4, the polyacrylate binder coating a significantly increased the breaking strength, particularly in the

warp direction. The coating penetrated the fabric structure well to hold the yarns together and this had a tendency to cause the particular thread breaking. The more carboxylic groups in the crosslinker increase, the more increase in breaking strength is obtained.

When the strength comparison in the warp and the weft direction are examined, it is was determined that noticeable changes in breaking strength (Figure 4) were obtained. This is an expected result. The higher number of yarns (thickness) per unit length in the warp direction in woven fabrics increases the breaking strength [35].

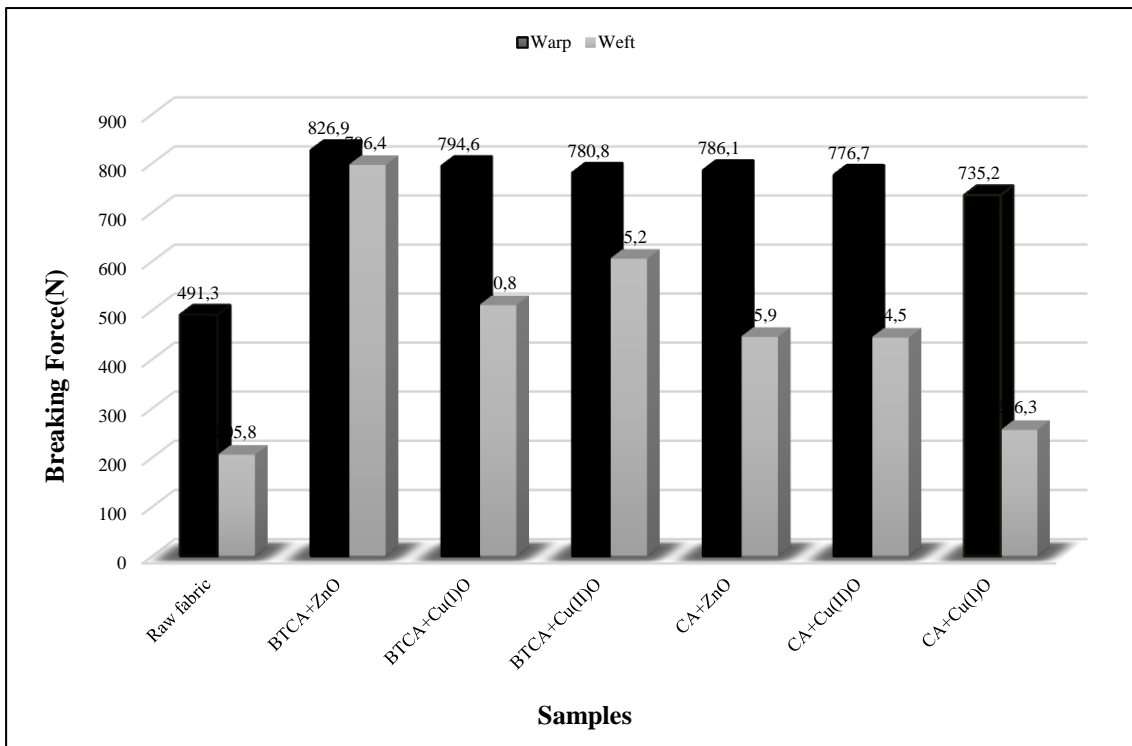


Figure 4. Breaking load test results

In addition to the elongation of the woven fabric itself, the relationship between coating thickness and crosslinkings plays an important role.

After the coating process with 1 g  $\text{Cu}_2\text{O}$ <5  $\mu\text{m}$ ,  $\text{CuO}$ <5  $\mu\text{m}$ ,  $\text{ZnO}$ <5  $\mu\text{m}$  and 5 g 1,2,3,4-BTCA chemical structure, a higher increase in the breaking strength was noticed.

BTCA has four carboxylic acid groups and a vinyl double bond. Since it generates two or more ester bonds, two macromolecules can be crosslinked more effectively. CA has three carboxylic acid groups and no vinyl double bonds. Carboxyl groups in CA are less reactive in cellulose esterification. Therefore, the crosslinking effects are not good as BTCA. The number of crosslinks

generated after the application increases breaking strength.

Example elongation at breaking strength plots from weft and warp direction testing (meaning fill yarns broke) are shown in Figure 5.

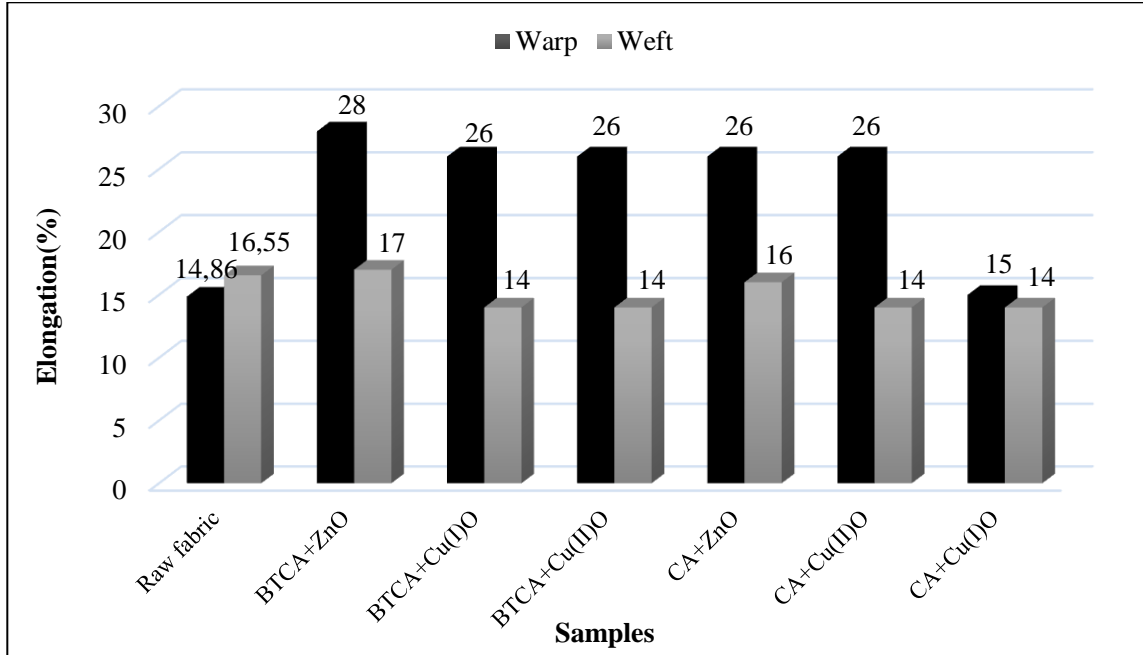


Figure 5. Elongation test results fabrics

As shown in Figure 5, the elongation at break increases more than the reference.

Moreover in weft direction, the same or slightly lower elongation at break values were obtained after coating with two crosslinkers according to the reference.

When the results of the elongation at break test are examined, it was observed that the results of coated fabrics and raw fabrics were close to each other in the weft direction. The highest breaking elongation in weft and warp direction was obtained by using BTCA+ ZnO acrylic coating.

Because of the application of the coating in the warp direction, the acrylic coating with the crosslinker affect the 28% elongation more in the warp.

### 3.2.2. Tearing Test Results

Tear resistance is one of the important properties of the fabric. Tear strength of a fabric refer to its resistance to tearing force.

The tear test results evaluated in Figure 6. They show decrease in tear strength in both warp and weft directions approximated to those of uncoated.

Warp tear strength decreases after the coating process. Weft tear strength increases after BTCA+Cu(I)O, BTCA+Cu(II)O and CA+Cu(II)O coating processes.

As seen in Figure 7, the more shrinkage in length is observed in the coated samples.

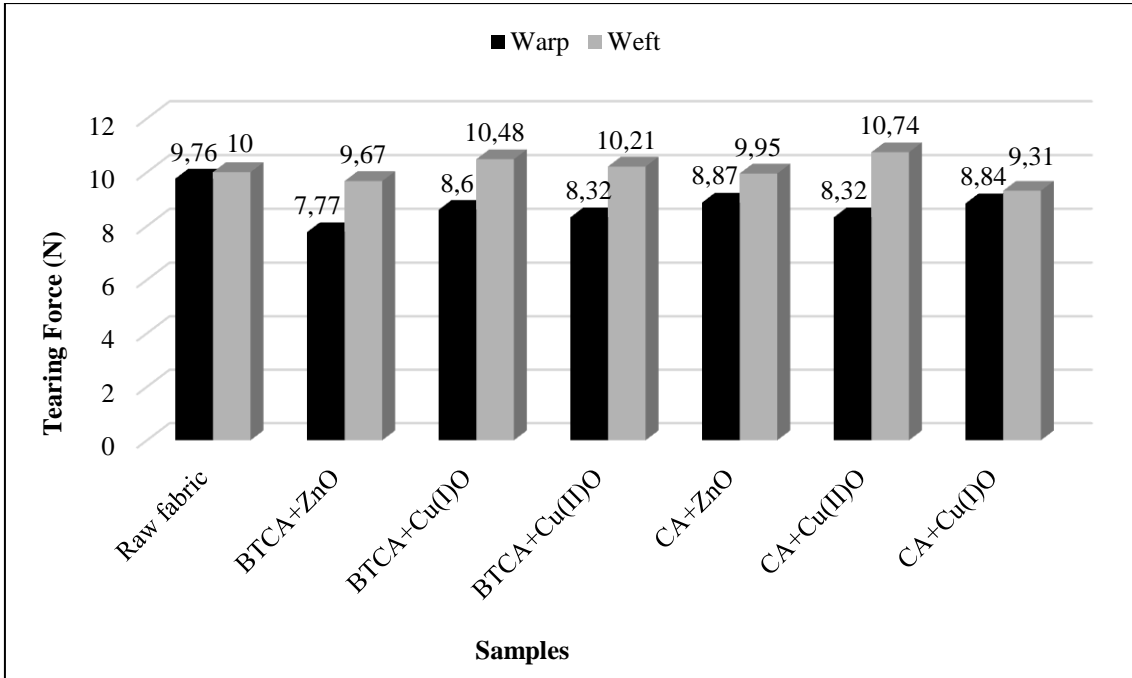


Figure 6. Tearing test results

As shown in Figure 6, the decrease tearing strength is observed when compared to the reference.

In the weft direction; there was no significant change in tearing strength relative to the reference.

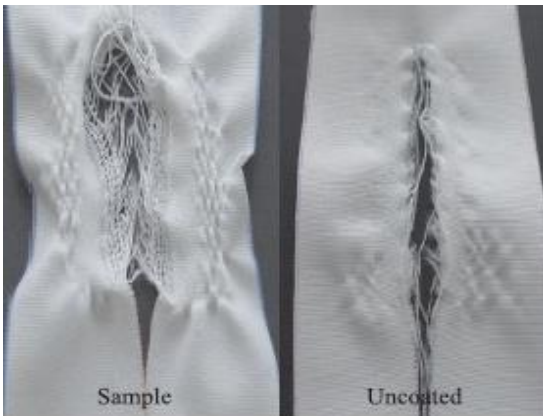


Figure 7. Samples of polyacrylate coated and uncoated fabrics in the warp direction

The tensile strength of a fabric, which is its resistance when a load is applied in the warp and

weft direction, is affected to some extent by the construction or every property of the coating with crosslinker.

Tear strength in woven fabrics; it depends on many factors such as fiber, yarn and fabric properties and coating processes applied to the fabric. Therefore, different results can be obtained after coating.

The curing at 160 °C 2 min reduced the tensile strength of fabric owing to more esterification and crosslinking, when it was treated with BTCA/SHP.

The same tendency has been followed for tear strength.

### 3.3. Statistical Analysis

The resulting model is statistically significant at  $\alpha=0.01$  with  $R=0.95$  and  $R^2=0.9025$ . The significant factors are coating recipes.

In this study, the effect of the coating recipes used on the breaking, elongation and tearing strength

values in the warp and weft directions were determined by performing a one-way analysis of variance in the SPSS statistical program representations were given in Table 8-12 and Figure 8. As seen in Table 13, the lowest tensile, elongation and tear strength values were obtained at PA 1b(Cu(I)O<5 μm+CA). The highest strength values were obtained in PA3a(ZnO<5μm+BTCA). Evidently, BTCA is more effective for esterifying cotton cellulose than is CA. Previous research also indicated that cotton fabric treated with BTCA forms a higher amount of ester than that treated with CA [21].

**Table 8.** Ranks

	Warp Weft	N Mean Rank	Sum of Ranks
Result	Warp	21 22.10	464.00
	Weft	21 20.90	439.00
	Total	42	

**Table 9.** Test statistics

	Result
Mann-Whitney U	208.000
Wilcon W Z	439.000
	-,315
Asymp.Sig (2-tailed)	,753

a. Grouping Variable: warp weft

**Table 10.** Ranks

	Breaking Elongation Tearing	N	Mean Rank
Result	Breaking	14	35.50
	Elongation	14	21.50
	Tearing	14	7.50
	Total	42	

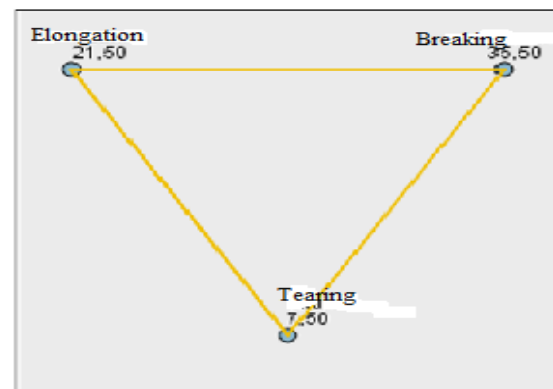
**Table 11.** Test Statistics

	Result
Qi-Square	36.527
df	2
Asymp. Sig.	,0001

a. Kruskal wallis test, b. Grouping variable breaking elongation tearing

**Table 12.** Ranks

	Recipe	N	Mean Rank
Result	Raw fabric	6	20.50
	PA 3a	6	23.83
	PA 1a	6	22.17
	PA 2a	6	21.58
	PA 3b	6	22.25
	PA 2b	6	21.08
	PA 1b	6	19.08
	Total	42	



**Figure 8.** Pairwise comparisons of breaking elongation tearing

**Table 13.** Each node shows the sample average rank of breaking elongation tearing

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig.
Tearing-Elongation	14.000	4.633	3.022	,003	,008
Tearing-Breaking	28.000	4.633	6.044	,000	,000
Elongation-Breaking	14.000	4.633	3.022	,003	,008

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same.

Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is 0.05.

#### 4. CONCLUSIONS

- 100% cotton fabric was used for this study in denim shirt fabric, acrylic coating process has

been applied with copper, zinc oxide particles. After coating, the breaking strength (newton), elongation at break (%) and tear strength (newton) were determined experimentally and the results were evaluated. In this study, cotton fabric was functionalized by cross-linking of polycarboxylic acid (BTCA and CA). In addition, BTCA and CA treatment could improve significantly the breaking strength and tearing strength of cotton fabrics. Coated woven fabrics by polyacrylate binder become mild. Breaking strengths in the warp and weft directions generally increased after the coating process. Coated fabrics with polyacrylate binder have a stronger structure compared to uncoated ones which is due to the higher density in the warp direction. Therefore, higher breaking strength results were obtained. In the fabric with less weft density, less number of yarns will resist the load and the breaking strength of the fabric in weft direction decreases. It was concluded that 5% concentration of BTCA was enough to obtain durable breaking strength.

2. When the elongation of this treated fabric were compared, it was determined that ZnO<5µm+BTCA had the best (28%) elongation.
3. The mechanical properties of the polyacrylate binder coating can have a major effect on the tear properties of coated woven fabrics. The tear properties of a polyacrylate binder coated woven fabric depend on the structure of crosslinking used. Since there is a loose structure in twill fabrics, the yarns slide over each other and it tears later. In this study, since medium hard polyacrylate binder, cross-linker and microparticles are applied to the fabric, it increases the friction between the yarns. It causes a decrease in tear strength.
4. Application to the better soft polyacrylate polymer with polycarboxylic crosslinking increased the breaking load of the coated fabric. Greater polyacrylate polymer led to a greater tensile load.

5. Utilization of the greater polycarboxylic crosslinking to a woven fabrics increased its flexible. In other words, coatings that add a noticeable mass to woven fabrics soften them. An elastic structure is generated owing to the cross-linking between BTCA, CA and cellulose. This leads to decrease in elongation at break.
6. Polycarboxylic acid crosslinkers generate an ester type crosslink with cotton. 1,2,3,4-butantetracarboxylic acid (BTCA) was more effective crosslinker compared to citric acid monohydrate (CA) owing to the four carboxylic groups in its structure. The better crosslinking of the fabrics treated with BTCA was caused by the existence of the four carboxylic acid groups in BTCA, which could generate the hydroxyl ion.
7. On the basis of the findings of this study, another study has been designed in which the combined effect of different cross-linkers, breaking strength, tearing strength will be studied.
8. According to the results of the one-way analysis of variance, it was found that the prescriptions were statistically significant at the 95% confidence level on the rupture, elongation and tear test results.

## 5. ACKNOWLEDGMENT

Editors and Publishing Coordinators of *ÇÜMF* thank to all authors and reviewers for their contributions.

## 6. REFERENCES

1. Soljačić, I., 1993. Textile Coating. *Tekstil*, 42(12), 673-686.
2. Mogahzy, Y.E., 2009. Engineering Textiles. Integrating the Design and Manufacture of Textile Products. The Textile Institute, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
3. Fung, W., Hardcastle, M., 2001. Textiles

- Automotive Engineering. The Textile Institute, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
4. Brandrup, J., Immergut, E.H., Grulke, E.A., 1999. Polymer Handbook. 4<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley & Sons.
  5. Fenichell, S., 1996. Plastic: The Making of a Synthetic Century. New York: Harper Collins.
  6. Seymour, R.B., Giant, C.E., 1990. Molecules. New York: John Wiley and Sons, Inc.
  7. Ulrich, H., 1982. Introduction to Industrial Polymers. Munich: Hanser.
  8. Skoko, M., 1998. Investigations of Properties and Multiaxial Strength and Degenerations of Coated Textile Fabrics. *Tekstil*, 47(7), 339-344.
  9. Kong, I., Yang, C.Q., Wei, W., Lickfield, G.C., 1998. Mechanical Strength of Durable Press Finished Cotton Fabrics: Part I: Effects of Acid Degradation and Crosslinking of Cellulose by Polycarboxylic Acids. *Textile Research Journal*, Nov. 1, 68, 865-870.
  10. Yang, C.Q., Qian, L., Lickfield, G.C., 2001. Mechanical Strength of Durable Press Finished Cotton Fabric. Part IV: Abrasion Resistance. *Textile Research Journal*, June 1(71), 543-548.
  11. Harper, R.J., Little, H.W., Blanchard, E.J., 1972. Cotton Yarn and Fabric Treatments Using Polymers with Various Glass-transition Temperatures. *Textile Research Journal*, Oct 1(42), 569-575.
  12. Yamamoto, K., 1982. Crease-resistance Finishing of Cotton Fabrics with Acrylate Copolymers and Dihydroxy Dimethylethylene Urea. *Textile Research Journal*, Jun 1(52), 363-369.
  13. Harper, R.J., Blanchard, E.J., Donoghue, M.J., 1970. Effect of Polyvinyl Alcohol on Textile Finishes. *American Dyestuff Reporter*, 59(12), 15.
  14. Abo-Shosha, M.H., Ibrahim, N.A., 1992. Water Soluble Polyether Polyurethanes as Finishing Additives in Easy Care Finishing of Cotton Fabrics. *Science International Lahour*, 4(2), 163.
  15. Hebeish, A., Amin, S.A., Nassar, F., Ibrahim, N.A., Hanna, H.L., 1982. Cellulose Chemistry and Technology, 16, 405.
  16. Yang, C.Q., 2013. Crosslinking: a Rout to Improve Cotton Performance. *AATCC Review*, 13, 43-52.
  17. Yang, C.Q., Wei, W., 2000. Mechanical Strength of Durable Press Finished Cotton Fabric. *Textile Research Journal*, 70(2), 143-147.
  18. Refaie, R., 2005. Polymeric Additives for Improving Performance Properties of Cotton Fabric Crosslinked with 1,2,3,4-Butanetetracarboxylic Acid. 8<sup>th</sup> Arab International Conference on Polymer Science & Technology, 27-30 Nov, Egypt.
  19. Chen, W., Gary, C., Lickfield & Others, 2001. Abrasion Resistance of Durable Press Finish Cotton., National Textile Center Annual Report: November, C00-C01: 1-8.
  20. Xu, W., Li, Y., 2000. Cotton Fabric Strength Loss from Treatment with Polycarboxylic Acids for Durable Press Performance. *Textile Research Journal*, 70(11), 957-961.
  21. Sauperl, O., Stana-Kleinschek, K., 2009. Cotton Cellulose 1,2,3,4 (BTCA) Buthanetetracarboxylic Acid Crosslinking Monitored by Some Physical-chemical Methods. *Textile Research Journal*, 79(9), 780-791.
  22. Sauperl, O., Stana-Kleinschek, K., 2009. Differences Between Cotton and Viscose Fibers Crosslinked with BTCA. *Textile Research. Journal*, 80(4), 383-392.
  23. Xu, W., 2003. Effect of Cross-linking Treatment on the Crystallinity, Crystallite Size, and Strength of Cotton Fibers. *Textile Research Journal*, 73(5), 433-436.
  24. Spencer, T.P., Hauser, P.B., Smith, B., 2006. Optimization of Ionic Cross-linking. North Carolina State University, 98.
  25. Hashem, M., Elshakankery, M.H., El-Aziz, S.M.A., Fouda, M.G., Fahmy, H.M., 2011. Improving Easy Care Properties of Cotton Fabric via Dual Effect of Ester and Ionic Crosslinking. *Carbohydrate Polymers*, 86, 1692-1698.
  26. Taylor, M., 1999. Technology of Textile Properties. Forbes Publications Ltd, London, 204.
  27. Yao, W., Wang, B., Ye, T., Yang, Y., 2013. Durable Press Finishing of Cotton Fabrics with Citric Acid: Improvement of Whiteness and Wrinkle Cure by Polyol Extenders. *Industrial*



- Engineering Chemistry Research, 52, 16118–16127.
28. Schramm, C., Rinderer, B., 1999. Influence of Additives on the Generation of Unsaturated PCAs Generated During Durable-press Curing with Citric Acid. *Color Technology*, 115, 306–311.
  29. Morris, C.E., Morris, N.M., Trask-Morrell, B. J., 1996. Interaction of meso-1,2,3,4-Butanetetra Carboxylic Acid with Phosphorus-Including Catalysts for Esterification Cross-linking of Cellulose. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 35, 950–953.
  30. Yang, C.Q., Wang, X., 1996. Generation of Cyclic Anhydride Intermediates and Esterification of Cotton Cellulose by Multifunctional Carboxylic Acids: An Infrared Spectroscopy Study. *Textile Research Journal*, 66, 595–603.
  31. Ibrahim, N.A., Abo-Shosha, M.H., Gaffar, M.A., 2001. Eco-friendly Durable Press Finishing of Cellulose-including Fabrics. *Journal of Applied Polymer Science*, 84, 2243–2253.
  32. Welch, C.M., 1988. Tetra Carboxylic Acids as Generalaldehyde-free Durable Press Finishing Agents Part I: Catalyst, Additive, and Durability Studies 1. *Textile Research Journal*, 58, 480–486.
  33. Choi, H.M., Welch, C.M., Morris, N.M., 1994. Nonphosphorus Catalysts for Generalaldehyde-free DP Finishing of Cotton with 1,2,3,4-Butanetetracarboxylic Acid: Part II: Sodium Salts of Fumaric, Maleic, and Itaconic Acids. *Textile Research Journal*, 64, 501–507.
  34. Hashem, M., Elshakankery, M.H., El-Aziz, S.M.A., Fouda, M.M.G., Fahmy, H.M., 2011. Improving Easy Care Properties of Cotton Fabric via Dual Effect of Ester and Ionic Crosslinking. *Carbohydrate Polymers*, 86, 1692–1698.
  35. Sungur, E.G., 2020. Doküma Kumaşların Yapısal ve Mekanik Özellikleri ile Dökümlülüğü Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 115.

## Sorel Çimentolu Hafif Betonların Mekanik ve Yalıtım Özelliklerinin İncelenmesi

Hüseyin TEMİZ\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-8654-103X  
Ergin TANDIRCI<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-1595-1330

<sup>1</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

Geliş tarihi: 02.07.2021 Kabul tarihi: 10.12.2021

*Atıf şekli/ How to cite: TEMİZ, H., TANDIRCI, E., (2021). Sorel Çimentolu Hafif Betonların Mekanik ve Yalıtım Özelliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 1073-1088.*

### Öz

Bu çalışmada, Sorel çimentolu hafif betonların (SÇ) bazı mekanik ve yalıtım özellikleri incelenmiştir. SÇ numunelerinin yalıtım özelliklerinde iyileştirmeler yapabilmek için SÇ karışımları içerisine; hava sürükleyici katkı (HSK), ahşap talaşı (AT), mısır koçanı talaşı (MT), Puzolanlı madde (P), Afşin-Elbistan Termik Santral uçucu külü (AEUK) katkıları ayrı ayrı ikame edilerek numuneler üretilmiştir. Numuneler, bazı mekanik testlere ve yalıtım testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca referans numunelerin (R) farklı ortam koşullarına karşı dirençleri incelenmiştir. Numune dayanım değerlerinin yüksekte düşüğe sırasıyla SÇ, SÇ+HSK, SÇ+P, SÇ+AEUK, SÇ+AT ve SÇ+MT olduğu tespit edilmiştir. SÇ+AEUK numunelerinin çatlaması nedeniyle SÇ ve AEUK malzemelerinin birlikte kullanılmalarının uygun olmadığı gözlemlenmiştir. Suda bekletilen SÇ numunelerinin dayanımlarının zamanla düştüğü saptanmıştır. Ortam sıcaklık artışının R numunelerinin dayanımlarında 100 °C'de artış, 500 °C ve sonrasında düşüğe neden olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak katkı kullanılan numunelerin R numuneye göre dayanımlarında düşüş, yalıtım özelliklerinde ise bazı iyileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Saptanan değerler kullanılan katkıların türüne ve oranına göre farklılık göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sorel çimentosu, Hafif ağırlıklı numune, Yalıtım, Hafif agrega, Dayanım

---

\* Sorumlu yazar (Corresponding author): Hüseyin TEMİZ, htemiz@ksu.edu.tr

## Investigation of Mechanical and Insulation Properties of Sorel Cement Lightweight Samples

### Abstract

In this study, some mechanical and insulation properties of Sorel cement lightweight concretes (SC) were investigated. In order to make improvements in the insulation properties of SC samples; Samples were produced by substituting air-entraining additive (HSK), wood shavings (AT), corn cob shavings (MT), Pozzolan substance (P), Afşin-Elbistan Thermal Power Plant fly ash (AEUK) additives separately. The samples were subjected to some mechanical tests and insulation tests. In addition, the resistances of the reference samples (R) against different environmental conditions were examined. It was determined that the sample strength values, from high to low, were SC, SC+HSK, SC+P, SC+AEUK, SC+AT and SC+MT, respectively. It has been observed that it is not appropriate to use SC and AEUK materials together due to the cracking of the SC+AEUK samples. It was determined that the strength of the SC samples kept in water decreased over time. It was observed that the increase in ambient temperature caused an increase in the strength of the R samples at 100 °C and a decrease at 500 °C and later.

As a result, it was obtained that the strength of the samples using additives decreased compared to the R sample, and there was some improvement in the insulation properties. The determined values differed according to the type and ratio of the additives used.

**Keywords:** Sorel cement, Lightweight sample, Insulation, Lightweight aggregate, Strength

### 1. GİRİŞ

Günümüzde insanın yaşamını devam ettirebilmesi için gerekli temel ihtiyaçlardan biri de enerjidir. Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülkenin nüfusuna ve üretim faaliyetlerine oranla nüfus artışı, sanayileşme ve kentleşme gibi etkenlere bağlı olarak bu ülkelerin enerjiye olan gereksinimleri hızla artmaktadır. Enerjiye olan ihtiyacın her geçen gün artması, enerji tüketimini de paralel olarak artırmaktadır.

Türkiye enerjide dışa bağımlı olan ülkelerden biridir. Ülkemizde son yıllarda hızla artan inşaat faaliyetleri ile birlikte binalarda tüketilen enerji miktarı da katlanarak artmaktadır [1]. Artan enerji tüketiminin; ülkelerin ekonomileri yanında insan ve çevre sağlığına da ciddi anlamda zarar vermesinden dolayı enerji tüketimini azaltmaya yönelik bu enerjinin muhafaza edilmesi ve tasarrufu üzerine yapılan çalışmalar son dönemde hız kazanmıştır.

Modern dünyanın ihtiyaçlarına uygun olarak, çevre kirliliğini azaltmak, endüstriyel atıkları

değerlendirmek ve bu atıkların kullanımını yaygınlaştırmak için son yıllarda bu konu ile ilgili kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır. Yeterince değerlendirilmeyen katkı maddelerinin yapı malzemesi üretiminde kullanılması halinde bazı mekanik ve yalıtım özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Bu yolla faydalı atık bertarafına katkıda bulunulabilir.

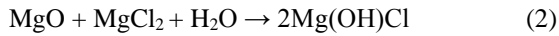
Magnezyum oksiklorür çimentosu (Sorel çimentosu) 1867'de Fransız araştırmacı Stanislaw Sorel tarafından keşfedilmiştir. Bu sebeple magnezyum oksiklorür çimentosu Sorel ismini almıştır. SÇ bazlı malzemeler, SÇ'nin normal Portland çimentosuna kıyasla bazı üstün özellikleri bulunması sebebiyle son zamanların araştırma konusu olarak ilgi odağı haline gelmiştir [2].

Sorel çimentosu, magnezyum oksit (MgO) ve magnezyum klorür (MgCl<sub>2</sub>) çözeltisinin farklı oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen özel bir çimentodur. SÇ'nin üretiminde kullanılan magnezya (MgO), deniz sularından veya ham manyezit mineralinden (MgCO<sub>3</sub>) elde edilir. Manyezit minerali ise doğada bulunduğu şekilde

doğrudan Sorel çimentosu karışımına girmez. Manyezit minerali bazı işlemlerden geçirildikten sonra Sorel çimentosu üretiminde kullanılabilir. Manyezit ( $MgCO_3$ ) mineralinden elde edilen magnezya, 750-1000 °C sıcaklıkları arasında kalsine edilerek meydana gelip kalsinasyon işlemi döner ya da dik fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Kalsine edilen Manyezit ( $MgCO_3$ ) daha sonra farklı boyutlara getirilip öğütülür. Bu işlem anında manyezitte bulunan  $CO_2$  ayrılarak  $MgO$  elde edilir [3] (Eşitlik 1).



Elde edilen  $MgO$ , su içinde  $MgCl_2$  içeren bir magnezyum klorür çözeltisi ile karıştırılır (Eşitlik 2).



SÇ'nin kullanım alanları olarak, otoyol yüzeylerinin yanı sıra sıva, yangına dayanıklı kaplamalar ve kalıplanmış çimento nesneleri gibi benzeri uygulamalarda hızlı priz alan bir çimento olarak kullanılır. Ring ve Ping (2007) yapmış olduğu çalışmada katı magnezyum oksit ( $MgO$ )'in magnezyum klorür ( $MgCl_2$ ) ve su ile karıştırılması ile SÇ elde etmiştir. Elde ettikleri çimentonun hızlı bir şekilde prizini aldığını gözlemişlerdir [4].

Daha çevreci bir yaklaşımla çevrenin korunmasına duyulan ihtiyaç konusunda giderek artan farkındalık nedeniyle, SÇ içeren araştırma konuları son zamanların araştırma konuları içerisinde artan bir ilgi odağı haline almıştır. Chau ve Li (2008) çalışmasındaki kapsamlı mikroskopik gözlemler, SÇ'nin kristal fazlarının genel olarak nano boyutlu küçük taneciklerden oluşan granüler bir yüzeyle farklı formlarda demetlenmiş iğne şeklinde kristaller olduğunu göstermektedir. Çimento hamurunun yüksek basınç dayanımına sahip masif ve yoğun mikro yapısında demetlenmiş iğne şeklindeki kristal izleri de gözlemlenmiştir [5].

Shahbazi ve Sadeghi (2016) çalışmasında, SÇ ile ürettikleri numunelerin su direncini ve basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Ayrıca hızlı priz alan SÇ karışımları için bazı katkı maddeleri

yardımıyla çimento priz süresini uzatmak istemişlerdir. Çalışmadaki sonuçlar, çimento içerisine ilave edilen bazı katkı maddelerinin (Cam elyafı, silisyum karbür tozu) çimentonun mekanik mukavemetini ve priz süresini artırdığını göstermektedir. Bununla beraber suya karşı dayanımı düşük olan SÇ numunelerinin karışım içerisine bazı katkı maddelerinin eklenmesiyle su direncinin artırılabilir olduğu görülmüştür [6].

İnşaat sektörünün sürekli gelişmesiyle birlikte düşük maliyetli, dayanıklı, hafif, uzun kullanım süresine sahip kompozit yapı malzemelerinin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Gürbüz ve Kork (2020) çalışmasında kompozit yapı malzemelerinden olan magnezyum oksit levhaları ele almışlardır.  $MgO$  levhaların kullanım alanı açısından çeşitli iklim koşullarına uygun kimyasal ve fiziksel bir yapıya sahip olduğu söylenebilir ve bu levhalar inşaat sektöründe hemen her alanda kullanılabilir kompozit panel olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel olarak kullanılan yapı levhalarının yerine  $MgO$  levhaların tercih edilmesi yangına ve darbeye dayanımının yüksek ve çevre dostu olmasından dolayı tercih edilebilir. Ancak  $MgO$  levhaların üretimi diğer yapı levhalarına kıyasla hazırlanışında sıkı kontrol gereksinimi, aşırı yüksek nemli ortamlarda deformasyona uğraması ve özellikle yüksek maliyetinden ötürü dünyada kullanımının olması gerektiği kadar yaygınlaşmadığı görülmektedir. Yapılan araştırma ve deneysel çalışmalar sonucunda magnezyum oksit levhaların diğer kompozit yapı malzemelerinden daha kullanışlı olduğu gözlemlenmiştir [7].

Bu çalışmada SÇ bağlayıcılı ve hafif agregalarla üretilen numunelerin mekanik ve yalıtım özellikleri incelenmiştir. Araştırılan numuneler referans numunesi SÇ ile ve diğer numuneler SÇ içerisine P, HSK, AEUK, AT ve MT malzemelerinin eklenmesi ile hazırlanmıştır. Numunelerin; eğilme-basınç dayanımı, ısı iletim katsayısı, ultrases geçiş hızı, birim hacim ağırlık, su emme ve görünür gözeneklilik, hacimsel genleşme, alkali silika reaksiyonu (ASR), yüzey alanı analizi (BET) incelenmiştir. Ayrıca, su ve sıcaklığın etkisine maruz bırakılan R numunelerin gösterdiği reaksiyon incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

**Magnezyum oksit (MgO):** SÇ'nin ana hammaddelerinden biri olan magnezyum oksidin yoğunluğu  $3,12 \text{ g/cm}^3$  olup kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir. MgO Şekil 1a'da görülmektedir.

**Çizelge 1.** Magnezyum oksit kimyasal analiz sonuçları [8]

Kimyasal Özellikler	Analiz Sonuçları (%)
MgO	85
CaO	2,5
SiO <sub>2</sub>	5,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1
Kızdırma Kaybı	3

**Çizelge 2.** Magnezyum oksit fiziksel analiz sonuçları [8]

Elek açıklığı (µm)	300 µm	150 µm	-150 µm
Yüzde geçen	100%	%5 max	95%

**Magnezyum klorür (MgCl<sub>2</sub>):** Kristal şeklindeki MgCl<sub>2</sub> deniz suyundan ya da manyezit (MgCO<sub>3</sub>) mineralinden elde edilir. Magnezyum klorürün molar ağırlığı  $203,31 \text{ g/mol}$  ve yoğunluğu  $1,569 \text{ g/cm}^3$ 'tür. MgCl<sub>2</sub> kimyasal özellikleri Çizelge 3'te belirtilmiştir. MgCl<sub>2</sub> Şekil 1b'de görülmektedir.

**Çizelge 3.** MgCl<sub>2</sub> kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal özellikler	MgCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub>	NaCl	KCl
Oranları (%)	46,5	21,12	0,51	0,31

**Su:** Karışımlarda şebeke suyu kullanılmış olup Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarından temin edilmiştir.

**Uçucu kül:** Çalışmada Afşin Elbistan Termik Santralından temin edilen uçucu kül (AEUK) kullanılmıştır. Bu külün yoğunluğu  $2,15 \text{ g/cm}^3$ 'tür ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir. AEUK Şekil 1c'de görülmektedir.

**Çizelge 4.** AEUK kimyasal analiz sonuçları [9]

Kimyasal özellikler	Analiz sonuçları (%)
SiO <sub>2</sub>	18,27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,26
CaO	53,44
MgO	1,74
K <sub>2</sub> O	0,38
Na <sub>2</sub> O	0,19
SO <sub>3</sub>	11,4
Kızdırma kaybı	2,12



**Şekil 1.** a) Magnezyum oksit, b) Magnezyum klorür, c) Afşin-Elbistan uçucu külü

**Puzolanik madde (Bims):** Araştırmada yararlanılan puzolan (bims) boşluklu, süngerimsi bir yapıya sahip olup volkanik olaylar sonucu meydana gelmektedir. Fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dayanıklıdır. Gözenekli ve camsı bir yapıya sahip volkanik bir kayaç olan puzolan, oluşumu esnasında bünyesindeki gazların hızlı bir şekilde bünyeyi terk etmesi ve ani soğuması sebebiyle sayısız gözenek barındırır. Puzolanik maddenin gözenekleri arası genellikle birbirleriyle bağlantısız oluşu ve boşluklu bir yapı barındırması sebebiyle, permeabilitesi düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir [10]. Yapılan bu deneysel çalışmada karışım içerisine ikame edilen puzolanik madde ile daha düşük birim hacim ağırlığına ve daha iyi ısı ve su yalıtımı değerlerine sahip bir malzeme elde edilmesi amaçlanmıştır. Puzolanik madde Şekil 2a'da görülmektedir.

**Hava sürükleyici katkı:** Bu tez çalışmasında hava sürükleyici katkı olarak MasterAir® 200 kullanılmıştır. MasterAir® 200, yağ alkolü ve amonyum tuzu esaslı bir katkı maddesidir. MasterAir® 200 karışım içerisinde kontrollü hava sürükleyerek kalıcı, küçük ve optimum aralıklı hava kabarcıkları oluşturan ve karışımın donma-çözülme döngüsüne karşı dayanıklılığını artıran, hava sürükleyici katkı malzemesidir [11]. Bu katkı maddesinin karışım içerisinde ikame edilmesiyle daha düşük birim hacim ağırlıklı ve daha iyi ısı ve su yalıtımı değerlerine sahip bir malzeme elde edilmesi amaçlanmıştır.

**Mısır koçanı talaşı:** Ülkemizde geniş bir ekim alanı bulunan mısırın ortasında yer alan genellikle sert bir yapıya sahip parçaya mısır koçanı denilmektedir. Bu çalışmada mısırın atık ürünü sayılan mısır koçanının yalıtım malzemesi olarak

değerlendirilebilmesi araştırılmış olup bu atık ürünün değerlendirilmesiyle çevreye ve ülke ekonomisine artı bir kazanç sağlanmak amaçlanmıştır. Öğütülmüş mısır koçanı talaşı Şekil 2b'de görülmektedir.

**Ahşap talaşı:** Son zamanlarda hammaddelerin verimli kullanılması ile beraber insanların çevreye olan duyarlılığındaki artış ve atık malzemelerin geri dönüştürülebilmesi üzerine yapılan araştırmalar oldukça yoğunlaşmıştır. Bu atık malzemelerin önemli bir bölümünü orman endüstrisi atıkları oluşturması sebebiyle bu çalışmada ayrıca kereste veya mobilya fabrikalarında açığa çıkan ahşap talaşı atıklarının yalıtım malzemesi olarak değerlendirilebilmesi incelenmiştir. Şekil 2c'de ahşap talaşı görülmektedir.



Şekil 2. a) Puzolanik madde, b) Mısır koçanı talaşı, c) Ahşap talaşı

## 2.2. Metot Numunelerin Hazırlanması ve Karışım Oranları

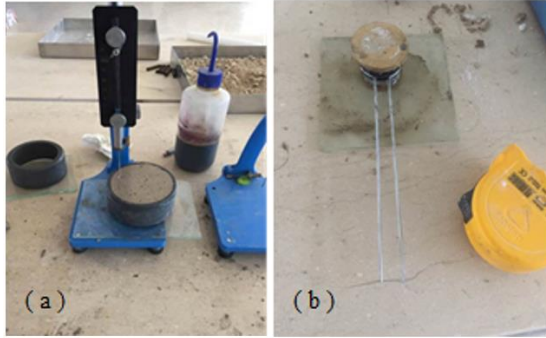
Bu çalışmada bağlayıcı olarak SÇ kullanılmıştır. SÇ'nin karışımına giren MgO ve MgCl<sub>2</sub> oranlarının belirlenmesinde 5 nolu referans esas alınmıştır [12]. Buna göre SÇ'nin karışımı %76 MgO + %24 MgCl<sub>2</sub>' den meydana getirilmiştir. R numunesi, önce MgCl<sub>2</sub> + suyun karıştırılmasıyla

elde edilen çözeltiye, MgO eklendikten sonra çimento mikseri ile yaklaşık 3-5 dakika karıştırılarak hazırlanmıştır. Üretilen numunelerin isimleri ve karışım miktarları Çizelge 5'te verilmiştir. R numunesine %1 oranında HSK ilave edilerek numuneler üretilmiştir. Diğer numuneler P, AEUK, MT ve AT katkıları ilave edilerek üretilmiştir.

**Çizelge 5.** Üretilen numunelerin karışım miktarları

Numune ismi	Miktarlar (g)						
	SÇ	Su	HSK	P	AEUK	MT	AT
R	1,740	320	-	-	-	-	-
SÇ+HSK	1700	300	17	-	-	-	-
SÇ+P	400	495	-	400	-	-	-
SÇ+AEUK	980	420	-	-	420	-	-
SÇ+MT	200	420	-	-	-	200	-
SÇ+AT	160	405	-	-	-	-	160

Hamur numunelerin priz başlama ve priz sona erme sürelerinin tayini ile hacimsel genişleme değerlerinin saptanmasında TS EN 196-3 standardı esas alınmıştır [13]. Şekil 3a ve b’de sırasıyla Vicat cihazı ile yapılan priz süresi ölçüm işlemi ve hacimsel genişleme saptanması görülmektedir.

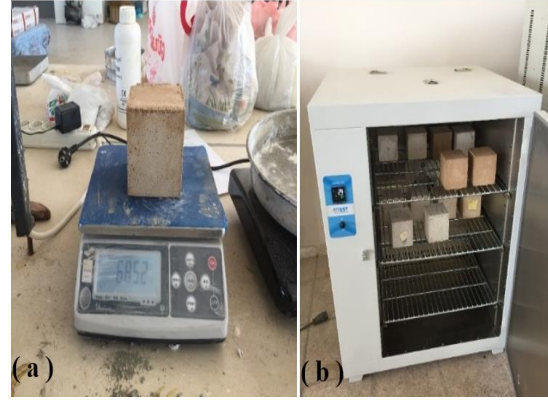


**Şekil 3.** (a) Priz süresi tayini, (b) Hacimsel genişlemenin bulunması

Karışımların birim hacim ağırlık değerlerini bulmak için her karışımdan üç adet 10x10x10 cm boyutunda küp numuneler alınmıştır. 28 günlük numuneler TS EN 772-13 standardı esas alınarak birim hacim ağırlık deneylerine tabi tutulmuştur [14]. Küp numunelerin 0,1 g hassas terazide tartılma işlemi Şekil 4a’da görülmektedir.

Karışımların su emme ve görünür gözeneklilik değerlerini bulmak için her karışımdan üç adet 10x10x10 cm boyutunda küp numuneler alınmıştır. 28 günlük numuneler TS EN 993-1 standardı esas alınarak su emme ve görünür gözeneklilik deneylerine tabi tutulmuştur [15].

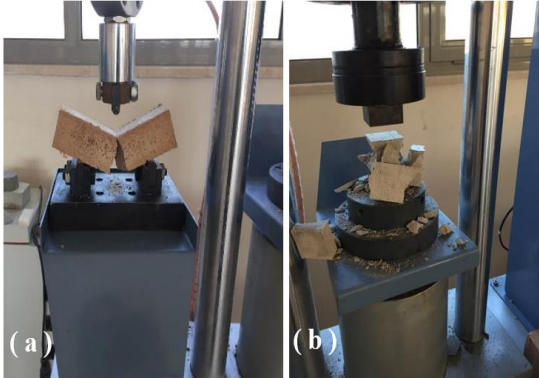
Küp numunelerin etüvde kurutma işlemi Şekil 4b’de görülmektedir.



**Şekil 4.** (a) Numunelerin tartılma işlemi, (b) Numunelerin etüvde kurutulma işlemi

Karışımların eğilme ve basınç dayanımlarını bulmak için her karışımdan 6 adet 4x4x16 cm boyutunda harç prizma numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler deney yaşlarına kadar kür edilmişlerdir. Ayrıca SÇ numunelerinin ısıya karşı dirençlerini saptamak amacıyla alınan numuneler oda sıcaklığı, 100 °C, 500 °C, 1000 °C sıcaklıkta ve kür tankı olmak üzere 5 farklı ortam koşullarında bekletilmiştir. Tüm bu numunelerin her karışımdan 3 adet 7 günlük ve 3 adet de 28 günlük olarak test edilmek üzere toplam altı adet numune alınmış ve bu numuneler TS EN 196-1 standardı esas alınarak eğilme ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur [16]. Şekil 5a ve b’de sırasıyla eğilme ve basınç dayanımı deneyi uygulaması görülmektedir.

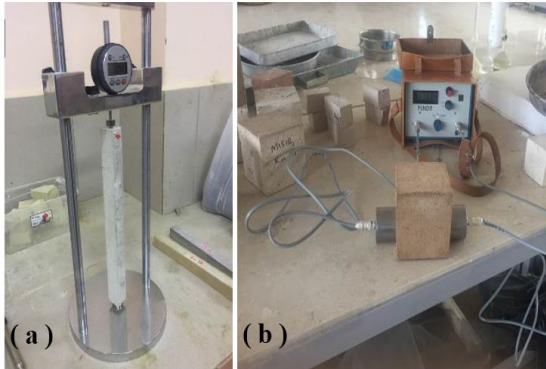




Şekil 5. (a) Eğilme dayanımı deneyi, (b) Basınç dayanımı deneyi

Karışımların boy değişimlerinin incelenmesi için hızlandırılmış yöntemlerden ASTM C1260 standardı esas alınmıştır [17]. Bu test yöntemi için her karışımdan üç adet 25x25x285 mm boyutunda prizma numuneler üretilmiştir. Alınan numuneler 14 gün %1 Na(OH) çözeltisi suda kür edildikten sonra teste tabi tutulmuşlardır. Prizma çubukların boy ölçüm işlemi Şekil 6a'da görülmektedir.

Karışımların ultrases geçiş hızı değerlerini bulmak için her bir karışımdan üç adet 10x10x10 cm boyutunda küp numuneler alınmıştır. Alınan numuneler 28 gün oda sıcaklığında bekledikten sonra ASTM C 597-16 standardı esas alınarak ultrases geçiş hızı testine tabi tutulmuştur [18]. Alınan küp numunelerin ultrases geçiş hızı ölçüm işlemi Şekil 6b'de görülmektedir.



Şekil 6. (a) Numunelerin boy ölçüm işlemi, (b) Ultrases geçiş hızı ölçüm işlemi

Karışımların ısı iletim katsayısı değerlerini bulmak için hazırlanan karışımlardan 20x20x5 cm boyutunda prizma numuneler alınmıştır. Alınan numuneler 28 gün oda sıcaklığında bekledikten sonra ASTM 1113-90 standardı esas alınarak Sıcak Tel Yöntemi ile çalışan Kem QTM 500 markalı termal iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı kullanılarak ısı iletim katsayısının belirlenmesi için teste tabi tutulmuştur [19]. Prizma numunelerin ısı iletim katsayısı ölçüm işlemi Şekil 7a'da görülmektedir.



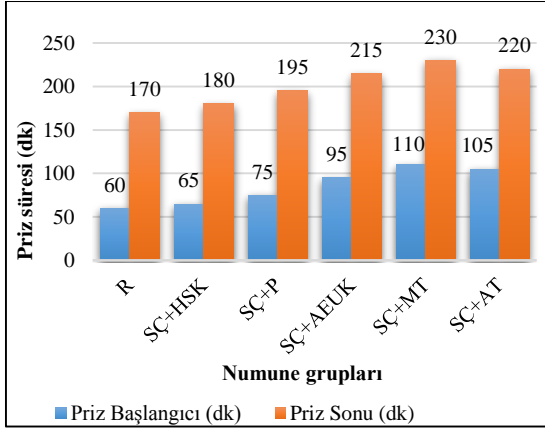
Şekil 7. (a) Isı iletim katsayısı ölçüm işlemi, (b) BET yüzey alanı ölçüm işlemi

BET yüzey alanı analizi için altı farklı karışımdan alınan numuneler öğütülerek toz hale getirilmiştir. Toz hale getirilen numunelerin BET yüzey alanı ölçüm analizi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Merkez Laboratuvarında bulunan Micromeritics Tristar II marka BET yüzey alanı ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin BET yüzey alanı ölçüm işlemi Şekil 7b'de verilmiştir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri

Hazırlanan altı farklı karışımın priz başlangıç ve bitiş süresi değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'deki priz süreleri üç adet deneyin ortalaması alınarak bulunmuştur.



Şekil 8. Priz başlangıç ve bitiş süreleri

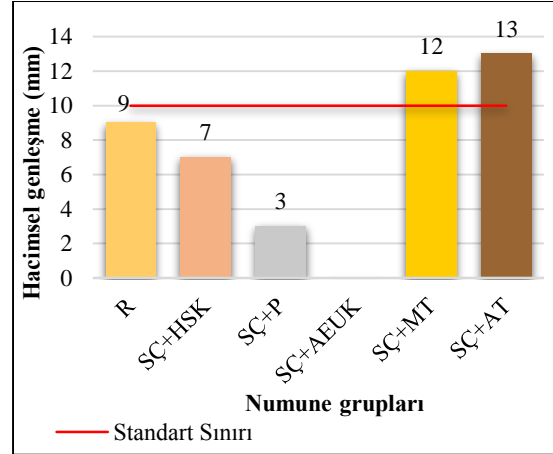
Şekil 8 incelendiğinde R hamurunun priz başlangıç ve bitiş sürelerinin daha kısa olduğu görülmektedir. R hamuruna göre karışıma %1 oranında HSK katılması priz başlangıç ve bitiş sürelerini sırasıyla %8 ve %6 uzatmıştır. Aynı şekilde karışıma giren P, AEUK, MT maddeleri priz başlangıç ve bitiş süresini uzatmıştır. Uzama süreleri sırasıyla P için %25 ve %15; AEUK'de %58 ve %27; MT'da %83 ve %35; AT'da %75 ve %29 olmuştur.

Austin ve Daniel (1949), Smith-Johannsen (1982), Ring ve Ping (2007), Öztürk ve arkadaşları (2008), Santra ve arkadaşları (2009) yaptıkları çalışmalarda SÇ ile hazırlanan numunelerin prizlerini oldukça hızlı bir sürede aldıkları görülmüştür [20,21,4,22,23]. Shahbazı ve Sadeghi (2016) çalışmasında SÇ içerisine ilave edilen katkı maddelerinin çimento priz süresine etkisini incelemiş ve bu ilave edilen katkı maddelerinin priz sürelerini arttırdığını gözlemlemiştir [6].

Elde edilen bulguların literatür ile tutarlı olduğu; bu bulgulara göre referans numunelerin priz başlangıç ve bitiş sürelerinin oldukça kısa olduğu, karışım içerisine ikame edilen katkı maddesinin türüne göre priz sürelerinin uzadığı görülmüştür.

### 3.2. Hacimsel Genleşme Değerleri

Hazırlanan karışımların hacim sabitliği (genleşme) tayini sonuçları Şekil 9'da verilmiştir. Hacimsel genleşme değerleri üç sonucun ortalamasıdır.



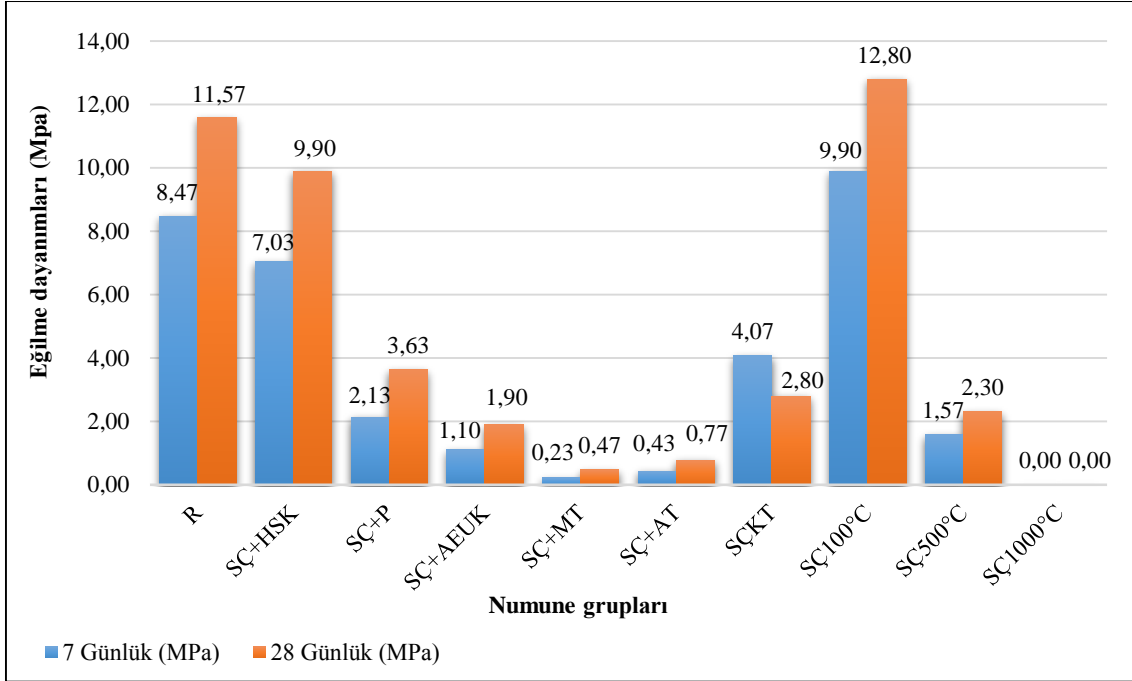
Şekil 9. Hacimsel genleşme değerleri

Şekil 9 incelendiğinde R, SÇ+HSK ve SÇ+P numunelerinin genleşme değerleri TS EN 196-3 standardında belirtilen 10 mm sınır değerinin altında kaldığı görülmüştür [13]. P katkısının genleşme miktarını azaltmasına, P'nin boşluklu yapısının neden olduğu düşünülmektedir. HSK katkısının genleşme miktarını yaklaşık %22, P maddesinin ise yaklaşık %67 azalttığı görülmüştür. MT ve AT maddeleri, karışımda bulunan suyun önemli bir kısmını absorbe ederek şişmesi sebebiyle standartta öngörülen 10 mm sınır değerinin üzerinde çıkmasına neden olmuşlardır. Zhengyuan (1993) çalışmasında SÇ ile üretilen karışımların sertleşmesi sırasında numunelerde sürekli hacim artışı sorunlarının olduğu görülmüş ve bu sorunun ise karışım için ekstra harmanlama sistemi geliştirilmesiyle çözülebileceğini belirtmiştir [24].

SÇ içerisine AEUK ilave edilmesiyle üretilen numunenin su ile temasından bir süre sonra dağıldığı görülmüş ve bu sebeple genleşme miktarı ölçülemediği görülmüştür.

### 3.3. Eğilme ve Basınç Dayanımı Tayini

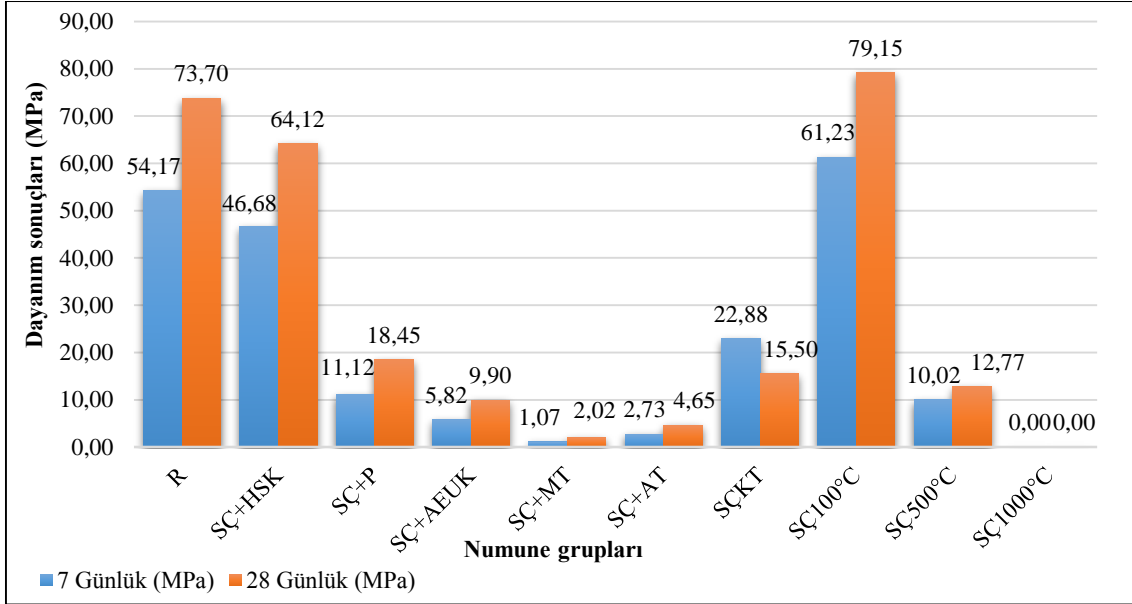
Numunelerin eğilme dayanımı sonuçları Şekil 10, basınç dayanımı sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. Eğilme dayanımı değerleri üç değer, basınç dayanımı değerleri ise altı değer ortalamasıdır.



Şekil 10. 7 ve 28 günlük prizma numunelerin eğilme dayanımları

Şekil 10'da verilen değerler incelendiğinde 7 günlük eğilme dayanımlarında en yüksek dayanım R numunesinde 8,47 MPa, en düşük dayanım ise SÇ+MT numunesinde 0,23 MPa bulunmuştur. R numunesine en yakın dayanım SÇ+HSK numunesinde 7,03 MPa elde edilmiştir. 28 günlük numunelerin eğilme dayanım değerleri de 7 günlük numunelerin eğilme dayanımı değerlerine benzerlik göstermiştir. Buna göre en yüksek dayanım R numunesinde 11,57 MPa, R'nin dayanımına en yakın SÇ+HSK numunesinde 9,9 MPa bulunmuştur. Bu grupta en düşük eğilme dayanımı değeri SÇ+MT numunesinde 0,47 MPa'dır. R numunesinin 28 günlük eğilme dayanımı, 7 günlüklere göre %37 artmıştır. Numunelerin yaşlarının artmasıyla eğilme dayanımları artmıştır. SÇ+P numunesinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 2,13 MPa ve 3,63 MPa'dır. Bu dayanımların R'nin dayanımına göre sırasıyla %75 ve %69 azaldığı görülmüştür. SÇ+AEUK numunesinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarının sırasıyla 1,10 MPa ve 1,90 MPa

olduğu ve R numunesine göre sırasıyla %87 ve %84 azaldığı görülmüştür. Şekil 10'da SÇ numunesinin oda sıcaklığında (R), kür tankında (SÇKT) ve 100 °C (SÇ100 °C), 500 °C (SÇ 500 °C), 1000 °C (SÇ1000°C) yüksek sıcaklıklı etüvde bekletilen numunelerin eğilme dayanımları incelendiğinde diğer numunelerin aksine su içinde bekletilenlerin 7 günde 28 günlüklere göre daha yüksek çıktığı saptanmıştır. Bu değerler sırasıyla 4,07 ve 2,8 MPa'dır. 28 günlük numunenin 7 güne göre düşüş oranı %31 dolayındadır. Bu sonuç SÇ numunelerinin su içinde dayanım kaybettiğini göstermektedir. En yüksek eğilme dayanımı 100 °C bekletilen numunelerde elde edilmiştir. 7 ve 28 günlük dayanım değerleri sırasıyla 9,9 MPa ve 12,8 MPa'dır. 28 günlük numunelerin eğilme dayanımları 7 güne göre yaklaşık %29 artmıştır. 500 °C'de çok küçük değerler elde edilirken, 1000 °C'deki numuneler dağılmış ve dayanım bulunamamıştır.



Şekil 11. 7 ve 28 günlük prizma numunelerin basınç dayanımları

Şekil 11’de verilen basınç dayanımları incelendiğinde sonuçların eğilme dayanımlarında meydana gelen değişimlere benzediği anlaşılmaktadır. 7 günlük R numunesinin basınç dayanımı 54,17 MPa iken 28 günlük numunede 73,7 MPa olmuştur. 28 günlük R numunelerinin 7 günlüklere göre artış oranı %36’dır. R numunesine en yakın basınç dayanımları SÇ+HSK numunesinde bulunmuştur. Sırasıyla 7 ve 28 günlük numunelerin basınç dayanımları 46,68 MPa ve 65,12 MPa’dır. SÇ+P numunesinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları 11,12 MPa ve 18,45 MPa; SÇ+AEUK’nün 5,82 MPa ve 9,90 MPa; SÇ+AT’nın 2,73 MPa ve 4,65 MPa’dır. En düşük değer ise SÇ+MT numunesinde olup 1,0 MPa ve 2,73 MPa çıkmıştır. Şekil 11’de SÇ numunesinin oda sıcaklığında, kür tankında ve 100 °C, 500 °C, 1000 °C yüksek sıcaklıklı etüvde bekletilen numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde diğer numunelerin aksine su içinde bekletilenlerin 7 günde 28 günlüklere göre daha yüksek çıktığı saptanmıştır. Bu değerler sırasıyla 22,88 MPa ve 15,50 MPa’dır. 28 günlük numunenin 7 güne göre düşüş oranı %32 dolayındadır. Bu sonuç SÇ numunelerinin su içinde dayanım kaybettiğini göstermektedir. En yüksek basınç dayanımı 100 °C bekletilen

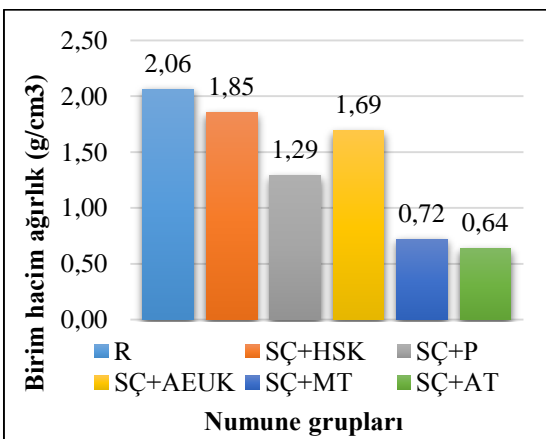
numunelerde elde edilmiştir. 7 ve 28 günlük dayanım değerleri sırasıyla 61,23 MPa ve 79,15 MPa’dır. 28 günlük numunelerin dayanımları 7 güne göre yaklaşık %29 artmıştır. 500 °C’de çok küçük değerler elde edilirken, 1000 °C’de numuneler dağılmış ve dayanım bulunamamıştır. Weber ve arkadaşları (2012) yaptığı çalışmada SÇ ile bazı dolgu malzemelerinin beraber kullanılması neticesinde yüksek basınç dayanımına sahip harç numuneleri elde edildiği belirtilmiştir [25]. Smith-Johannsen (1982) yaptığı çalışmada, SÇ normal Portland çimentosuna göre yanmaya ve ısıya karşı direncinin oldukça fazla olduğu görülmüştür [21]. Santra ve arkadaşları (2009) yaptıkları çalışmada SÇ numunelerinin yüksek sıcaklıkta stabil olduklarını gözlemlemişlerdir [23]. Gürbüz ve Kork (2020), geleneksel olarak kullanılan yapı levhalarının yerine MgO levhaların kullanılmasının yangına dayanımının yüksek ve çevre dostu olmasından dolayı tercih edilebilir sonucuna varmıştır [7]. Austin ve Daniel (1949), Smith-Johannsen (1980) (1982), Moraitou (1994), Öztürk ve arkadaşları (2008) ve Gürbüz ve Kork (2020) yapmış oldukları çalışmalarda SÇ ile üretilen numunelerin suya karşı dirençlerinin oldukça zayıf, yüksek nemli ortamlarda

numunelerin deformasyona uğradığı bu sebeple numune dayanımlarının olumsuz etkilendiği görülmüştür [20,21,26,22,7].

Bulunan dayanım sonuçlarının literatür ile uyumlu olduğu saptanmıştır. Bu sonuçlara göre referans numunelerin dayanım değerlerinin oldukça yüksek çıktığı, karışım içerisine ikame edilen katkı maddelerinin cinsine göre numune dayanım değerlerinde düşüşler görülmüştür. Karışım içerisine ikame edilen; HSK maddesinin karışım içerisine bir miktar hava sürüklemesi, P katkı maddesinin ise boşluklu ve gözenekli bir yapıda olması referans numuneye göre dayanım değerlerinde düşüşlerin meydana gelmesine neden olduğu düşünülmektedir. SÇ+AEUK ve SÇKT numunelerinde zamanla gözle görülür bir şekilde çatlakların oluşmasının dayanım düşüklüğüne sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca SÇKT numunesinin 7 günlük dayanım değerlerinin 28 günlük dayanım değerlerinden yüksek olması SÇ numunelerinin suya karşı direncinin zayıf olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla yüksek nemli ortamın SÇKT numune dayanımlarını olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

### 3.4. Birim Hacim Ağırlık

Numunelerin birim hacim ağırlık deney sonuçları Şekil 12’de verilmiştir. Şekil 12’deki birim hacim ağırlık değerleri üç adet deneyin ortalaması alınarak bulunmuştur.



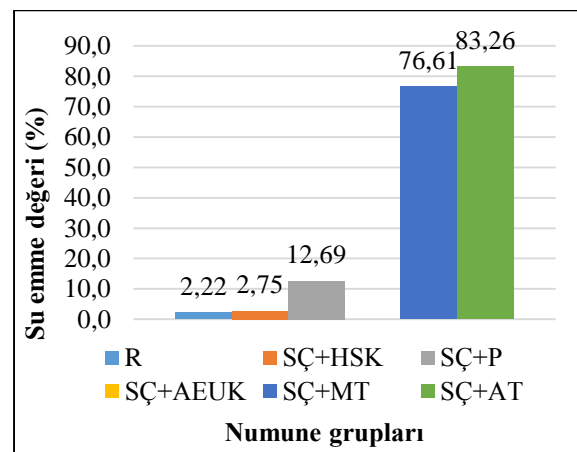
Şekil 12. Birim hacim ağırlıkları

Şekil 12’de verilen değerler incelendiğinde, en yüksek birim hacim ağırlık değerinin 2,06 g/cm<sup>3</sup> ortalama ile R numunelerinde olduğu görülmektedir. HSK katkısının birim hacim ağırlık değerini yaklaşık %10, AEUK ikamesinin yaklaşık %18, P maddesinin yaklaşık %37, MT maddesinin yaklaşık %65, AT maddesinin yaklaşık %69 azalttığı görülmüştür. SÇ+HSK, SÇ+AEUK, SÇ+P, SÇ+MT ve SÇ+AT numunelerinin birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 1,85 g/cm<sup>3</sup>, 1,69 g/cm<sup>3</sup>, 1,29 g/cm<sup>3</sup>, 0,72 g/cm<sup>3</sup> ve 0,64 g/cm<sup>3</sup> olduğu görülmektedir.

Karışım içerisine ikame edilen; HSK maddesinin karışım içerisine bir miktar hava sürüklemesi, P katkı maddesinin ise boşluklu ve gözenekli bir yapıda olması referans numuneye göre birim hacim ağırlık değerlerinde düşüşlere neden olduğu düşünülmektedir. Kullanılan Sorel çimentosuna kıyasla AEUK, MT ve AT katkı maddelerinin özgül ağırlıklarının düşük olması bu katkı maddeleri ile üretilen numunelerin birim hacim ağırlıklarının da düşük olmasına neden olmuştur.

### 3.5. Su Emme ve Görünür Gözeneklilik Deney Sonuçları

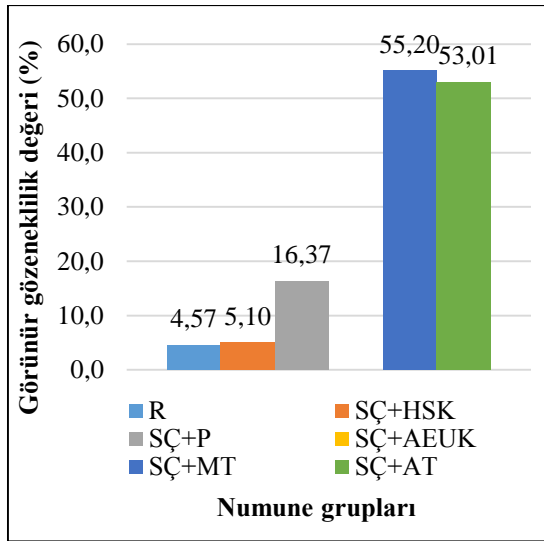
Numunelerin su emme ve görünür gözeneklilik deney sonuçları sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14’de verilmiştir. Su emme ve görünür gözeneklilik deney sonuçları üç adet deneyin ortalaması alınarak bulunmuştur.



Şekil 13. Su emme değerleri



Şekil 13'te verilen değerler incelendiğinde %2,22 ortalama ile en düşük su emme değerlerinin R numunelerinde olduğu görülmüştür. SÇ+HSK numunelerinin su emme oranı %2,75'tir. Bu değer R numunesinin su emme oranından %24 fazladır. SÇ+P numunelerinin su emme oranı %12,69'dur. En yüksek su emme oranı SÇ+AT numunelerinde %83,26, en yüksek ikinci ise %76,61 ile SÇ+MT numunelerindedir.



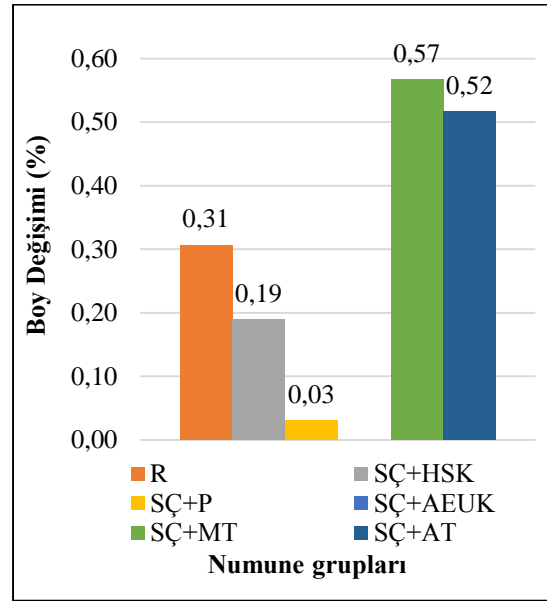
Şekil 14. Görünür gözeneklilik değerleri

Şekil 14'te verilen değerler incelendiğinde; %4,57 ortalama ile en düşük görünür gözeneklilik değerlerinin R numunelerinde, %55,20 ortalama ile en yüksek SÇ+MT numunelerinde olduğu görülmektedir. SÇ+HSK numunesinde görünür gözeneklilik oranı %5,10, SÇ+P numunesinde %16,37, SÇ+AT numunesinde %53,01'dir.

Ahşap talaşı, mısır koçanı talaşı ve puzolanik maddelerin boşluklu yapıda olması; HSK maddesinin karışım içerisinde bir miktar hava sürüklemesi sebebiyle SÇ+HSK numunesinin daha boşluklu bir yapıda olması numunenin su emme oranlarını ve görünür gözeneklilik değerlerini artırmıştır. SÇ+AEUK numunelerinin su içerisinde dağılması nedeniyle su emme oranları ve görünür gözeneklilik değerleri bulunamamıştır.

### 3.6. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Sonucu

Numunelerin hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları Şekil 15'te verilmiştir. Hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları üç adet deneyin ortalaması alınarak bulunmuştur.



Şekil 15. Hızlandırılmış harç çubuğu

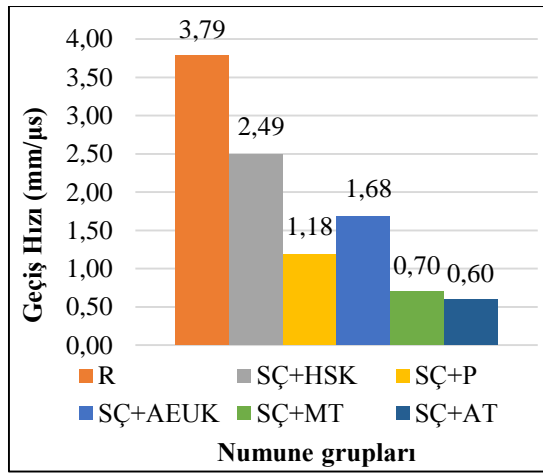
Şekil 15'teki veriler incelendiğinde en düşük boy değişimi SÇ+P numunesinde %0,03 bulunmuştur. İkinci en düşük SÇ + HSK numunesinde %0,19, R numunesinde %0,31 ve en fazla genleşme SÇ+MT numunesinde %0,57 bulunmuştur. SÇ+AEUK numunelerinin su içerisinde konulduktan bir süre sonra dağılmasından dolayı bu numunelerin boy değişimi değerleri ölçülemedi. Sonuçların; R, SÇ+HSK, SÇ+MT ve SÇ+AT numunelerinde ASTM C 1260 standardına göre 14 günlük boy değişiminin maksimum sınırı olan %0,1'in üstünde bir değerde olduğu görülmüştür.

R numuneye göre SÇ+HSK ve SÇ+P numunelerinin Na(OH) çözeltisi suya karşı dirençlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu direnç artışının ikame edilen HSK ve P katkı maddeleri sayesinde olduğu özellikle SÇ ile P katkı

maddesinin oldukça iyi uyumluluk gösterdiği tespit edilmiştir.

### 3.7. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonucu

Numunelerin ultrases geçiş hızı deney sonuçları Şekil 16'da verilmiştir. Ultrases geçiş hızı deney sonuçları üç adet deneyin ortalaması alınarak bulunmuştur.



Şekil 16. Ultrases geçiş hızları

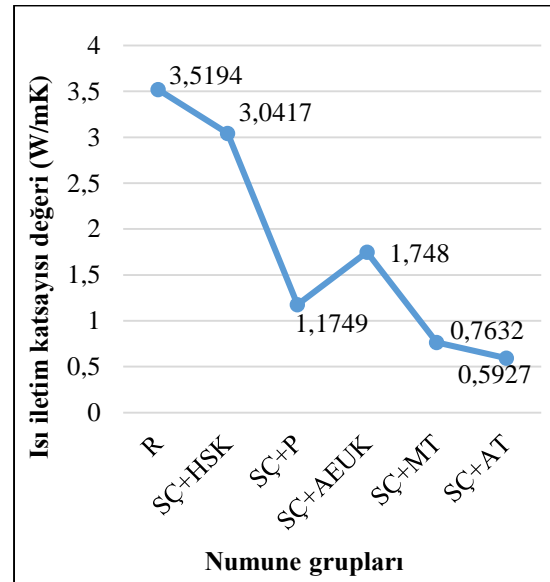
Şekil 16'da verilen değerler incelendiğinde 3,79 mm/μs ortalama ile en yüksek ultrases geçiş hızı değerlerinin R numunelerinde olduğu görülmüştür. 2,49 mm/μs ile ikinci en yüksek ultrases geçiş hızı değeri SÇ+HSK numunesinde olduğu ve R numunesine göre ultrases geçiş hızı değeri yaklaşık %35 azaldığı görülmüştür. SÇ+AEUK, SÇ+P, SÇ+MT ve SÇ+AT numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri sırasıyla 1,68 mm/μs, 1,18 mm/μs, 0,70 mm/μs ve 0,60 mm/μs olduğu görülmektedir. R numunesine kıyasla SÇ içerisinde; AEUK ikamesinin ultrases geçiş hızı değerini yaklaşık %56, P maddesinin yaklaşık %69, MT maddesinin yaklaşık %82, AT maddesinin yaklaşık %84 azalttığı görülmüştür.

SÇ ile kullanılan katkı maddelerinin ses yalıtımına pozitif bir katkı sağladığı görülmüştür. Karışım içerisinde ikame edilen; HSK maddesinin karışım içerisinde bir miktar hava sürüklemesi, P katkı maddesinin ise boşluklu ve gözenekli bir yapıda

olması nedeniyle referans numuneye göre ultrases geçiş hızı değerlerinde düşüşler sağlamıştır. Ayrıca karışım içerisinde MT ve AT katkı maddelerinin kullanılmasının ultrases ses geçiş hızlarını büyük oranda düşürdüğü bu sebeple bu iki katkının karışımında kullanılmasının ses yalıtımı açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

### 3.8. Isı İletim Katsayısı Deney Sonucu

Numunelerin ısı iletim katsayısı deney sonuçları Şekil 17'de verilmiştir. Isı iletim katsayısı deney sonuçları üç adet deneyin ortalaması alınarak bulunmuştur.



Şekil 17. Isı iletim katsayıları

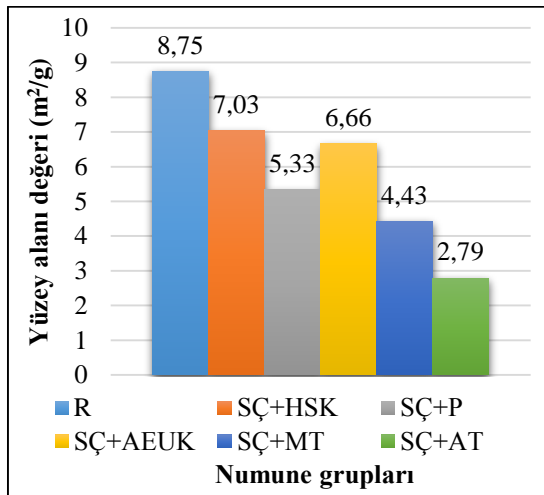
Şekil 17'de verilen değerler incelendiğinde 3,5194 W/mK ortalama ile en yüksek ısı iletim katsayısı değerinin R numunelerinde olduğu görülmüştür. HSK katkısının ısı iletim katsayısı miktarını yaklaşık %14, AEUK ikamesinin yaklaşık %50, P maddesinin yaklaşık %67, MT maddesinin yaklaşık %78, AT maddesinin yaklaşık %83 azalttığı görülmüştür. SÇ+HSK, SÇ+AEUK, SÇ+P, SÇ+MT ve SÇ+AT numunelerinin ısı iletim katsayısı değerleri sırasıyla 3,0417 W/mK, 1,748 W/mK, 1,1749 W/mK, 0,7632 W/mK ve 0,5927 W/mK olduğu görülmektedir.



SÇ ile kullanılan katkı maddelerinin ısı iletim katsayısı değerlerini düşürdüğü tespit edilmiştir. Karışım içerisine ikame edilen; HSK maddesinin karışım içerisine bir miktar hava sürüklemesi, P katkı maddesinin ise boşluklu ve gözenekli bir yapıda olması nedeniyle referans numuneye göre ısı iletim katsayısı değerlerinde düşüşler sağlamıştır. Ayrıca karışım içerisinde MT ve AT katkı maddelerinin kullanılmasının ısı iletim katsayılarını büyük oranda düşürdüğü bu sebeple bu iki katkının karışımında kullanılmasının ısı yalıtımı açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

### 3.9. BET Yüzey Alanı Analizi

Numunelerin BET yüzey alanı analiz sonuçları Şekil 18'de verilmiştir. BET yüzey alanı deney sonuçları üç adet deneyin ortalaması alınarak bulunmuştur.



Şekil 18. BET yüzey alanı analizleri

Şekil 18'de verilen değerler incelendiğinde 8,75 m²/g ortalama ile en yüksek BET yüzey alanı değerinin R numunesinde olduğu görülmüştür. HSK katkısının BET yüzey alanı değerini yaklaşık %20, AEUK ikamesinin yaklaşık %24, P maddesinin yaklaşık %39, MT maddesinin yaklaşık %49, AT maddesinin yaklaşık %68 azalttığı görülmüştür. SÇ+HSK, SÇ+AEUK, SÇ+P, SÇ+MT ve SÇ+AT numunelerinin BET yüzey alanı değerleri sırasıyla 7,03 m²/g, 6,66

m²/g, 5,33 m²/g, 4,43 m²/g ve 2,79 m²/g olduğu görülmektedir.

Elde edilen bulgulara göre referans numunesinin BET yüzey alanı değerlerinin yüksek olduğu saptanmıştır. Karışım içerisine ikame edilen katkı maddelerinin türüne göre BET yüzey alanı değerlerinde düşüşler görülmüştür.

## 4. SONUÇ

Hazırlanan altı farklı karışım numunelerine uygulanan eğilme ve basınç dayanımı testleri neticesinde; eğilme ve basınç dayanım değerlerinin en yüksek R numunelerinde, en düşük SÇ+MT numunelerinde olduğu gözlemlenmiştir.

R numunelerinin bulunduğu ortam sıcaklığının artması eğilme ve basınç dayanımı değerlerine 100 °C sıcaklığa kadar pozitif bir etkide bulunurken belirli bir sıcaklıktan sonra ise dayanım değerlerinde düşüşe hatta numunelerde parçalanmalara neden olduğu görülmüştür.

Kür tankında bekletilen numunelerin bekleme süresiyle numuneler üzerinde meydana gelen çatlakların orantılı olduğu, oluşan bu çatlakların zamanla numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarında önemli miktarda düşüşlere neden olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple Sorel çimentolu malzemelerin sudan ve yüksek nemli ortamdan korunması önerilmektedir.

R karışımların priz sürelerinin kısa olduğu tespit edilmiştir. Karışım içerisine ikame edilen katkı maddeleri sayesinde bu priz sürelerinin uzatılabileceği düşünülmektedir.

R karışımlarından elde edilen numunelerin belirli bir sıcaklığa kadar oldukça dirençli olduğu saptanmıştır. Bu sebeple sıcaklığın yüksek olduğu ortamlarda Sorel çimentolu karışımların kullanılması önerilebilir.

Elde edilen bulgular neticesinde; R numunesine kıyasla SÇ içerisine HSK, P ve endüstriyel atık malzemesi olan AEUK, MT ve AT malzemelerinin eklenmesiyle numunelerin yalıtım özelliklerinde

iyileşmelerin meydana geldiği görülmüştür. Ancak eğilme ve basınç dayanımlarında düşüşe neden olmuşlardır.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, YLS 2019/6-13 no'lu proje kapsamında yapılmış olup Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Rektörlüğü BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Türkiye Mühendislik Haberleri, 2015. Binalarda Isı Yalıtımı ve Isı Yalıtım Malzemeleri. [https://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/17182\\_44\\_51.pdf](https://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/17182_44_51.pdf). (Erişim Tarihi:11.03.2021).
2. Tatarczak, A., Fic, S., 2015. Additives in Sorel Cement Based Materials-impact Study. In Proceedings of the International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering, Ottawa, Canada, Paper (No. 318).
3. Özer, O., 1996. Türkiye'de Üretilen Kostik Kalsine Manyezitlerinin İncelenmesi ve Sorel Çimentosu Parametrelerinin Araştırılması. (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
4. Ring, T., Ping, E., 2007. Sorel Cement Reactions and Their Kinetics. In the 2007 AIChE Annual Meeting.
5. Chau, C.K., Li, Z., 2008. Microstructures of Magnesium Oxychloride Sorel Cement. *Advances in Cement Research*, 20(2), 85-92.
6. Shahbazi, B., Sadeghi, F.D., 2016. Investigation Physical Properties of Magnesium Oxychloride Cement (Sorel Cement).
7. Gürbüz, A., Kork, Y.E., 2020. Magnezyum Oksit (MgO) Levhalar Üzerine Bir Derleme. *Sciennovation*, 2(1), 29-38.
8. Özertaş Kimya Maden, 2021. Magnezyum Oksit Kimyasal ve Fiziksel Analiz. <https://ozertas.com.tr/tr/pages/sinter-manyezit-madeni-ozertas-kimya-maden>. (Erişim Tarihi:11.01.2021).
9. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinoğlu, A., 2009. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, 20-34.
10. Maden Tetkik ve Araştırma Genel Müdürlüğü, Tipik Pomza Mineralini Oluşturan Özellikler. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/pomza#:~:text=G%C3%B6zenekler%20aras%C4%B1%20genelde%20ba%C4%9Flu%20nt%C4%B1s%C4%B1z%20bo%C5%9Fluklu,%20C%20pek%C5%9F%20Deyim%20ayr%C4%B1%20C4%B1r>. (Erişim Tarihi:25.02.2021)
11. Basf, MasterAir 200 Teknik Bilgi Föyü. [https://www.izoagra.com/images/uploads/bayi/dosya/masterair-200\\_56E782.pdf](https://www.izoagra.com/images/uploads/bayi/dosya/masterair-200_56E782.pdf). (Erişim Tarihi:03.03.2021).
12. Jurišová, J., Fellner, P., Pach, L., 2015. Characteristics of Sorel Cement Prepared from Impure Materials. *Acta Chimica Slovaca*, 8(2), 87-90.
13. TS EN 196-3, 2017. Çimento Deney Yöntemleri-Bölüm 3: Priz Süreleri ve Genleşme Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
14. TS EN 772-13, 2002. Kağır Birimler- Deney Metotları-Bölüm 13: Kağır Birimlerin Net ve Brüt Kuru Birim Hacim Kütlelerin Tayini (Doğal Taş Hariç), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
15. TS EN 993-1, 2020. Yoğun Refrakter Mamuller için Deney Metotları-Kısım 1: Kaba Yoğunluk, Görünür Porozite ve Hakiki Porozitenin Tayini.
16. TS EN 196-1, 2016. Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
17. ASTM C1260-14, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)
18. ASTM C597-16, 2016. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
19. ASTM C 1113-90, Test Method for Thermal Conductivity of Refractories by Hot Wire (Platinum Resistance Thermometer Technique).
20. Austin, L. W., Daniel, R., 1949. U.S. Patent No. 2,466,145. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

21. Smith-Johannsen, R., 1982. U.S. Patent No. 4,352,694. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
22. Öztürk, A., Timuçin, M., Göktaş, A., Özer, S.M., 2008. GRE Esaslı Seramik Karoların Yüzeylerinin Parlatılmasında Kullanılabilecek Kompozit Parlatma Disklerinin Üretimi, ODTÜ Proje No: 105M140, 58.
23. Santra, A.K., Liang, F., Fitzgerald, R., 2009. Sorel Cement for HP/HT Downhole Applications. In SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. Society of Petroleum Engineers, doi.org/10.2118/121102-MS.
24. Zhengyuan, Z., 1993. Sorel Cement Property Experiment and Improvement Study. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 02.
25. Weber, J., Bayer, K., Pintér, F., 2012. Nineteenth Century “Novel” Building Materials: Examples of Various Historic Mortars Under the Microscope. In Historic Mortars, Springer, Dordrecht, 89-103.
26. Moraitou, A., 1994. Meyer Cement and its Effect on the Propylaea Marble. In International Meeting (4<sup>th</sup>) on the Restoration of the Acropolis Monuments: English Summaries, 92-92.

## Vardiyalı Çalışanların Gürültü Algı Yanılgısının İncelenmesi

Mehmet Zeki ACAR<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-9312-1431

Mehmet KARAKILÇIK<sup>\*2</sup> ORCID 0000-0003-3659-3875

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Adana

<sup>2</sup>Çukurova Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 01.06.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: ACAR, M.Z., KARAKILÇIK, M., (2021). Vardiyalı Çalışanların Gürültü Algı Yanılgısının İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 1089-1097.

### Öz

Bu çalışmada, vardiyalı çalışanların gürültü algısı yanılgıları araştırılmıştır. Bu amaçla, Sunar Grup bünyesindeki Sunar Mısır Entegre Tesisleri kepek depolama ve ham yağ ünitesinde gece ve gündüz vardiyalarında çalışanların gürültü şiddeti algılama tepkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için, gece ve gündüz vardiyalarında çalışanların gürültüye maruz kaldıkları otobüse biniş ve varış noktalarında (dış ortam), ve kepek depolama ve ham yağ ünitesinde (iç ortam) gürültü şiddeti ölçümleri yapılmıştır. Çalışanların gündüz ve gece dış ortamda maruz kaldıkları farklı gürültü şiddetinin algı yanılgısına neden olduğu ve bunun çalışanlar üzerindeki olumsuz etkileri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, gece vardiyasında çalışanların dış ortamlar ile iç ortamlar arasındaki gürültü şiddeti farkı sırasıyla, 16,67 dB ve 15,67 dB'lik gürültü şiddetini doğru algıladığı için kulaklıkla çalıştığı görülmüştür. Ancak, gündüz vardiyasında çalışanların gürültü şiddeti farkını yeteri kadar algılayamadıkları için kulaklık kullanmadan çalıştıkları belirlenmiştir. Bu nedenle özellikle gündüz vardiyası çalışanlarının, kulaklık veya kulak tıkacı ile kulaklarının korunması için gerekli tüm önlemler alınmalıdır. Ayrıca kapalı ortamda gürültüye neden olan taşıma helezonu, silo havalandırma fanları, pres ve kabuk soyma makineleri iyileştirilmeli veya yenileri ile değiştirilmelidir.

**Anahtar Kelimeler:** Vardiyalı çalışma, Gürültü, Gürültü algı yanılgısı, Kulak koruyucu

### Investigation of Noise Perception Misconception of Shift Workers

#### Abstract

In this study, noise perception misconception of shift workers was investigated. For this purpose, it has been tried to determine the noise intensity perception response of the employees night and day shifts in the bran storage and crude oil unit of Sunar Mısır Integrated Facilities within Sunar Group. For this, noise intensity measurements were made at the boarding the bus and arrival points (outdoor environment) and bran storage/crude oil unit (indoor environment) where those working in day and night shifts are exposed to noise. It has been evaluated that the different noise intensity that the employees are exposed to during the day and night in the external environment causes a false perception and the negative effects of this on the employees. As a result, it has been observed that night shift workers work with headphones because they correctly perceive the noise intensity differences between the outside environments and the indoor

\*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Mehmet KARAKILÇIK, [kkilcik@cu.edu.tr](mailto:kkilcik@cu.edu.tr)

environments, 16.67 dB and 15.67 dB, respectively. However, it was determined that those working in the day shift could not perceive the difference in noise intensity sufficiently, so they worked without using headphone. For this reason, all necessary precautions should be taken to protect of the ears with earplugs or headphones, especially for day shift workers. In addition, conveying auger, silo ventilation fans, press and debarking machines that cause noise in the indoor environment should be improved or replaced with new ones.

**Keywords:** Shift work, Noise, Noise perception misconception, Ear protection

## 1. GİRİŞ

Sanayi Devrimi ile birlikte makinaların üretim alanına girmesiyle daha fazla üretim yapılmıştır. Daha fazla kazanmak için vardiyalı çalışma sistemine geçilmiştir. Böylece, Dünya’da büyük endüstri kuruluşları ile başlayan vardiyalı çalışma iş hayatında önemli bir mesai kavramı haline gelmiştir. Ancak, vardiyalı çalışma hayatı ile birlikte, özellikle iş sağlığı ve güvenliği (İSG) açısından yeni sorunlar ortaya çıkmıştır. Bunlar, fizyolojik, psikolojik ve sosyolojik olarak çalışanların sağlığını etkileyen etmenlerdir. İSG açısından bu sorunların çözülmesi için teknik ve yasal önlemlerin alınması bir zorunluluktur. Vardiyalı çalışmaların çalışanlar üzerinde oluşan fizyolojik etkiler, geçici veya sürekli işitme bozuklukları (kayıpları), kan basıncının artması, dolaşım bozuklukları, solunumda hızlanma, kalp atışlarında yavaşlama ve ani reflekslere yol açmaktadır. Psikolojik etkiler, davranış bozuklukları, aşırı sinirlilik ve aşırı tepkiler, hoşnutsuzluk, tedirginlik, streslerdir. Sosyolojik etkiler ise, aile ve sosyal yaşamı olumsuz etkilemesi ile aile içi huzurun ve sosyal iletişimin bozulmasıdır. Bu etkilerin çalışanların iş veriminin düşmesine, konsantrasyonun bozukluğuna, hareketlerinin yavaşlamasına, dinlenmesinin bozulması gibi birçok sağlık sorunlarına yol açtığı birçok araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [1-5].

Vardiyalı çalışmalarda özellikle gece vardiyasında çalışanların psikolojik, sosyal açıdan fiziksel ve duygusal olarak olumsuz etkilendiğini tespit edilmiştir [6]. Ancak, vardiyalı çalışmanın günümüzde, artan talep yüzünden kaçınılmaz bir çalışma sistemi haline geldiğini belirtilmiştir. Aselsan'daki vardiyalı çalışanlar fizyolojik ve psikolojik olarak incelenmiş ve bazı çalışanlarda

birtakım kardiyovasküler ve sindirim sistemi semptomları gözlenmiştir [7]. Vardiyalı çalışma sisteminin çalışanlar üzerinde sadece psikolojik ve sosyolojik olarak değil aynı zamanda fizyolojik olarak sağlık üzerinden birçok farklı etkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca, çalışanların sağlık, güvenlik ve sosyal açıdan iyilik halinin de olumsuz etkilendiği saptanmıştır [8]. Vardiyalı çalışanlar içinde de gece vardiyası çalışanlarında uyku bozukluğu nedeniyle parasomni görülme sıklığının gündüz vardiyasında çalışanlara göre daha fazla olduğu görülmüştür [9].

Çalışanların üretim eylemine paralel olarak karşılaştığı tehlike ve riskler gün geçtikçe farklılık göstermektedir. Değişen risklere karşı alınması gereken önlemler gün geçtikçe çeşitlilik kazanmaktadır. Gelişen endüstrileşme ve teknolojik gelişmeler neticesinde günümüzde potansiyel risklere karşı yeni İSG önlemlerinin alınması gerekmektedir [10]. Özellikle, vardiyalı çalışan bireylerin sağlıklı beslenme eğitimleri almaları, beslenmelerinin bir diyetisyen tarafından düzenlenmesi ve kronik hastalıklara karşı koruyucu önlem alınması ve uyku kalitelerinin artırılmasının önemli olduğu görülmüştür [11]. Vardiyalı ve vardiyasız çalışan işçilerin depresyon, anksiyete ve stres durumlarını etkileyen faktörlerin çalışanların sağlığını olumsuz etkilemektedir [12]. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Araştırma ve Uygulama Hastanesi ve Sivas Numune Hastanesi'nin tüm birimlerinde, gece vardiyasında (16:00-08:00 saatleri arasında) çalışan hemşirelerin meme kanseri risk düzeyi ile uyku kalitesi arasında ilişki olduğunu saptanmıştır [13]. Vardiyalı sistemde çalışanların uyku düzenlerinde meydana gelen düzensizliğin kurum içinde iş tatmini, uyku kalitesi ve hijyen, ve iş doyumunu ile uyku kalitesi arasında ilişki olduğu görülmüştür [14].

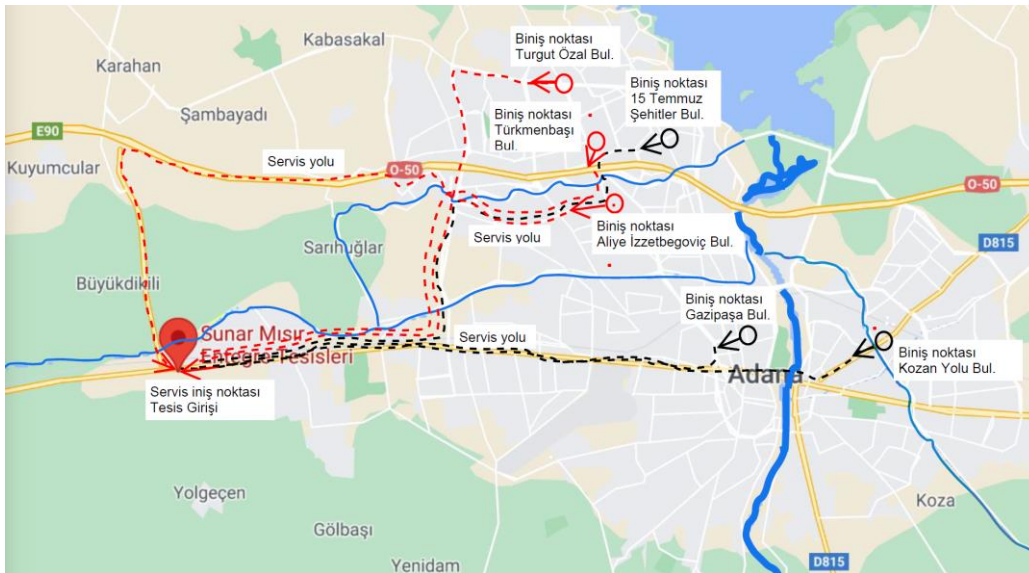
Son yıllarda yapılan birçok bilimsel çalışmalarda vardiyalı çalışmaların çalışanlar üzerinde birçok olumsuz etkileri belirtilmiştir. Ancak, fiziksel etmenlerden birisi olan gürültü şiddetinin vardiyalı çalışmalarda çalışanlar üzerinde bıraktığı algının davranışsal etkisinin daha önce incelenmemiş olması motivasyonumuzda önemli enerji kaynağı olmuştur.

Bu çalışmalar ışığında, önemli fiziksel etmenlerde birisi olan gürültünün, farklı ortamlarda farklı düzeylerde algılanmasının vardiyalı çalışanlar üzerinde oluşturduğu algı yanılığının İSG açısından etkisi incelenecektir. Bunun için, “Tehlikeli Sınıfta” bulunan bir Entegre Endüstriyel Yağ Sanayi’de yapılan vardiyalı çalışmalarda gündüz ve gece vardiyasında çalışanların dış ortam ve iç ortam arasındaki gürültü farkını algılama düzeylerine göre verdiği davranışsal tepkileri gözlemlenecektir. Bu amaçla, vardiyalı çalışanların servise bindikleri ortam (dış ortam) ve tesiste çalışacakları bölümlerden olan kepek deposu ve ham yağ ünitesi (iç ortam) arasındaki gürültü farkının çalışanlar üzerinde oluşturduğu algı belirlenecektir. Algılama sorununun kaynaklanan aşırı gürültü kaynaklı riske karşı kulak koruyucu (kulaklık) kullanımına olan hassasiyetleri belirlenmeye çalışılacaktır. Elde edilen bulgulara

göre, gürültünün oluşturabileceği risklerinin bertaraf edilmesi için alınabilecek önleyici ve düzeltici tedbirlerin alınması sağlanacaktır. Ayrıca, gürültülü ortamlarda yapılan çalışmalarda, farklı gürültülü ortamların çalışanlar üzerindeki algı yanılığına dikkat çekilecektir. İSG talimatlarına göre çalışanların kulaklık kullanmaları önerilecektir.

## 2. MATERYAL VE METOT

İşyerlerinde insan sağlığını olumsuz etkileyebilecek Fiziksel Risk Etmenleri (FRE); Gürültü, titreşim, termal konfor, aydınlatma, iyonize-noniyonize ışın, alçak ve yüksek basınç gibi fiziksel etkililerdir. İşyerlerindeki iş yapma ortamlarında çoğunlukla makineler ile iş yapılmaktadır. Çalışanlar iş yaptıkları bu makinelerle birlikte aynı ortamda bulunmak zorundadır. 6331 sayılı kanuna bağlı yönetmelikte “Çalışanların Gürültü İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelikte” makinelerin çıkardığı gürültünün en düşük maruziyet eylem değeri olan 80 dB’yi geçmemesi istenir. Ancak, bazı makinelerin çıkardığı gürültünün en yüksek maruziyet eylem değeri olan 85 dB’in üzerine gürültü kaçınılmazdır [15].



Şekil 1. Çalışanların servis aracı biniş-iniş noktaları ve hareket hattı [17]

Bu durumda, “Kişisel Koruyucu Donanımların İşyerlerinde Kullanılması Hakkında Yönetmelik” belirtildiği üzere, yüksek gürültülü ortamlarda çalışanların “Kişisel Koruyucu Donanımı (KKD)” olan kulaklıkla çalışması istenir [16].

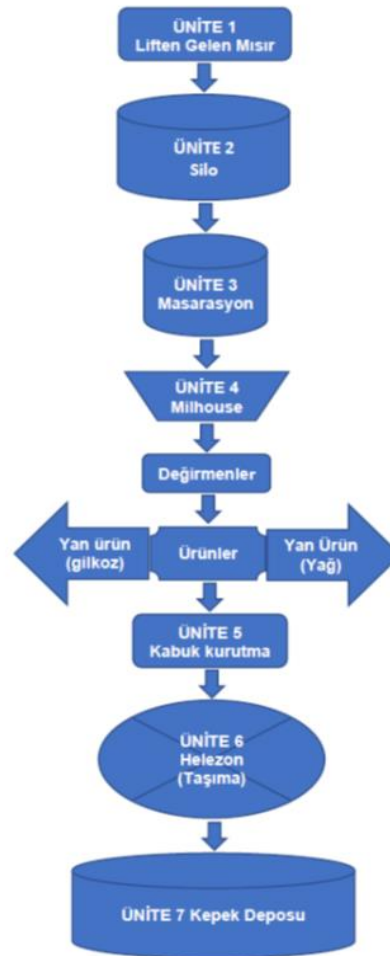
Şekil 1’de, Adana ili Seyhan İlçesinde yer alan Sunar Mısır Entegre Tesisleri Sanayi kepek deposu çalışanların servise biniş noktası (O→) ve hareket doğrultusu (---), ham yağ ünitesi çalışanların servise biniş noktası (O→) ve hareket doğrultusu (---) servisten iniş noktası (tesis girişi) servis hareket haritası üzerinde verilmiştir. Çalışanların çalışma ortamları kepek deposu ve ham yağ ünitesidir.

Vardiyalı çalışanların servis yolculuğu süresi gündüz ve gece vardiyaları için sırasıyla 25 ve 20 dakikadır.

Gündüz ve gece vardiyası çalışanları çalışma ortamlarına ulaşmaya kadar şehir içi gürültüye maruz kalmaktadır. Bu gürültü, yolculuk süresi boyunca çalışanlar üzerinde bir gürültü algısı oluşturmaktadır. Çalışanların iş yaptıkları çalışma ortamı olan kepek deposu ve ham yağ ünitesi ise farklı bir gürültülü ortamdır.

Şekilde 2’deki ürün akış şemasında görüldüğü gibi, mısır ürünü Ünite 1 (lift) den gelir ve mısır taşıma helezonlarla Ünite 2’deki siloya aktarılır. Ürün buradan helezonlarla Ünite 3’deki Masarasyon’a geçer. Burada kükürtlü sıcak suya 48 saat maruz kalan mısır tanesi parçalanacak kıvama kadar şiştikten sonra Ünite 4’deki Millhouse’deki değirmenlerde kırılır. Kırılan mısır tanelerinin içindeki yağlı öz konveyörlerle ham yağ bölümüne gönderilirken, geriye kalan nişasta sütü glikoz ünitesine enzimlere maruz kaldıktan sonra glikoz yapılmak üzere gönderilir. Mısır tanesinden kalan kabuk kısmı ise, Ünite 5’te kurutularak Ünite 6’daki taşıma helezonları vasıtasıyla Ünite 7’deki kepek deposuna iletilir. Bu işlemlerin yapılmasında kapalı ortamda birçok elektrik makinaları çalışmaktadır. Bu makinaların her birisi bir gürültü kaynağıdır. Ham yağ ünitesinde bulunan Millhouse değirmeninde mısırın kırılması ile ayrıştırılan mısır özü mekanik kırma uğramak üzere silindirlere geçirilir ve

mısır özünde bulunan ve elde edilmesi istenen ham yağın yaklaşık %73’lük kısmı çıkarılarak rafineri ünitesine gönderilir. Kalan küspe ekstraksiyon tesisine gönderilir. Tüm bu işlemlerin yapılmasında kapalı ortamda birçok makine çalışmaktadır. Bunların her birisi bir gürültü kaynağıdır.



Şekil 2. Tesisin ürün akış şemasında

Gürültü ölçümünde kullanılan elektronik cihaz olarak Şekil 3’deki “PCE-MSM 4” gürültü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Gürültü ölçüm cihazının hassasiyeti  $4\pm 1,4$  dB dir. Yüksek hassasiyet/görüntüleme için A ve C frekans değerlendirmesi ve 4 haneli LCD ekranına sahiptir [18].





Şekil 3. Gürültü ölçüm cihazı [18]

Farklı ortamların gürültü şiddetinin çalışanlar üzerinde oluşturduğu gürültü algı yanılığının çalışanların davranışları üzerindeki etkisini belirlemek için servise bindikleri ve indikleri noktalarda ve çalışma ortamlarında gündüz ve gece gürültü ölçümleri yapılacaktır. Gürültünün çalışanlar üzerinde oluşturduğu algı yanılığını belirlemeye çalışılacaktır. Böylece, çalışanların gürültüye karşı algı durumlarından kaynaklanan sorunlar belirlenecek ve çalışanların gürültüden korunması için gerekli önlemler daha etkin bir şekilde alınabilecektir. Bu çalışmada, ölçümler her bir çalışanın farklı vardiyası da görev alacağı süre göz önüne alınarak 30 günlük bir süre içerisinde yapılmıştır. Böylece, bir entegre endüstriyel tesis içinde bulunan birimlerde çalışanların gürültü algı yanılığını belirlenerek gürültü kaynaklarının risk oluşturmadan bertaraf edilmesi mümkün olabilecektir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Türkiye’de ve Dünya’da büyüyen gıda ihtiyacı ve doğal katkı maddelerinin yetersiz kalması endüstriyel gıda ihtiyacının doğmasına sebep olmuş ve endüstriyel gıda zamanla toplumun vazgeçilmezi haline gelmiştir. Günlük üretimin artırılması için iş saatlerinin de artırılması yoluna gidilmiştir. Üretimin artırılması için vardiyalı çalışmaların yapılması bir zorunluluk haline gelmiştir. Özellikle tehlikeli sınıftaki endüstriyel sanayilerde iş yoğunluğu ve vardiyalı çalışmalardan kaynaklanan olası iş sağlığı ve güvenliği riskleri ve nedenlerinin incelemesinin önemli hale gelmiştir.

Önceki çalışmalarda, vardiyalı çalışmalardan kaynaklanan birçok fizyolojik ve psikososyal risklerin çalışanlar üzerindeki olumsuz etkilerinden bahsedilmiştir. Ancak, gündüz ve gece vardiyalarında yapılan çalışmalarda gürültü kaynaklı risklerin değerlendirilmesinde, çalışmalar tarafından gürültünün tam olarak algılanamaması sonucu ortaya çıkan gürültü algı yanılığını nedeniyle kulak koruyucularını (kulaklık) kullanmadıkları gibi bazı sorunları da beraberinde getirdiği görülmüştür.

Önemli bir entegre endüstriyel kuruluş olan ve “Tehlikeli Sınıfta” yer alan bir işyeri olan Entegre Sunar Mısır Sanayi Tesisi’nde en az “B sınıfı” İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) uzmanları çalışabilir. Tesis kendi İş Sağlığı ve Güvenliği Birimi (İSGB)’yi kurmuştur. Bu birimde kadrolu olarak, bir işyeri hekimi, bir sağlık personeli, bir A, üç B sınıfı ve 3 İSG teknikeri olmak üzere toplam 9 İSG profesyoneli bulunmaktadır. Tesisin önemli bölümlerinden olan kepek deposu ve ham yağ ünitesinde 3 vardiya çalışmalar yapılmaktadır. Bu nedenle, kepek deposu ve ham yağ ünitesinde gündüz veya gece vardiyalarının her biri 7,5 saattir. Mesai boyunca gürültüye mazur kalan çalışanlar için bazı değerlendirme yapılmıştır.

Kepek deposu ve ham yağ ünitesinde vardiyalarında çalışanların gürültüye karşı algı yanılığını belirlemek için gündüz ve gece vardiyaları için çalışanların servise bindikleri 3 ana arter ve fabrika girişlerinde gündüz ve gece olmak üzere gürültü ölçümleri yapılmıştır [18].

Çizelge 1. Kepek deposu çalışanlarının servise biniş noktaları gürültü şiddeti

Biniş noktası	Gürültü şiddeti (dB)	
	Gündüz	Gece
Turgut Özal Bulvarı	78,6	69,7
Türkmenbaşı Bul.	77,4	68,8
Aliya İzzetbegoviç Bul.	77,1	68,3

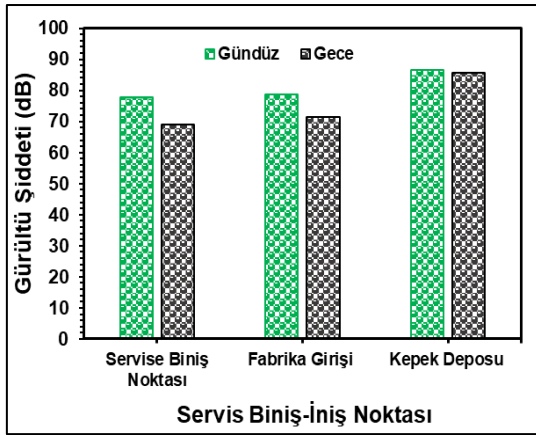
Çizelge 1’de kepek deposu çalışanlarının 3 farklı servise biniş noktası için yapılan ölçümlere göre, en yüksek gürültülü servise biniş noktasının gündüz için 78,6 dB ve gece için 69,7 dB ile Turgut Özal Bulvarı olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 2.** Ham yağ ünitesi çalışanlarının servise biniş noktaları gürültü şiddeti

Biniş noktası	Gürültü şiddeti (dB)	
	Gündüz	Gece
15 Tem. Şehitleri Bul.	77,9	69,6
Gazipaşa Bulvarı	78,9	67,5
Kozan Yolu	78,1	71,3

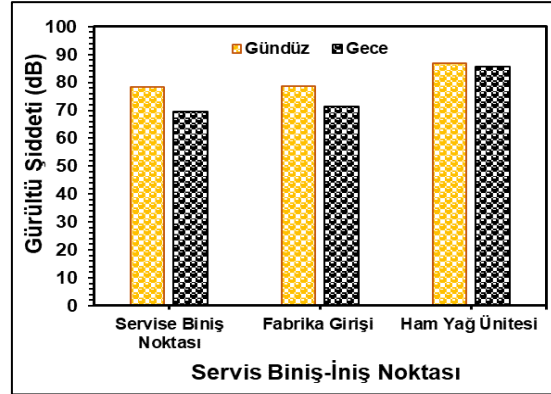
Çizelge 2’de, ham yağ ünitesi çalışanlarının 3 farklı servise biniş noktası için en yüksek gürültü, servise biniş noktasında, gündüz 78,9 dB ile Gazipaşa Bulvarı ve gece ise 71,3 dB ile Kozan Yolu olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4’de kepek deposu, işçi servisi biniş ve iniş (fabrika girişi) noktalarının gündüz ve gece gürültü şiddeti değerleri verilmiştir. Çalışanların gündüz ve gece maruz kaldığı ortalama gürültü şiddeti, servise biniş noktasında sırasıyla, 77,7 ve 68,93 dB, fabrika girişinde sırasıyla 78,70 ve 71,50 dB ve ham yağ deposunda ise 86,70 ve 85,60 dB olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.** Kepek deposu çalışanlarının maruz kaldığı gündüz-gece gürültü şiddeti dağılımı

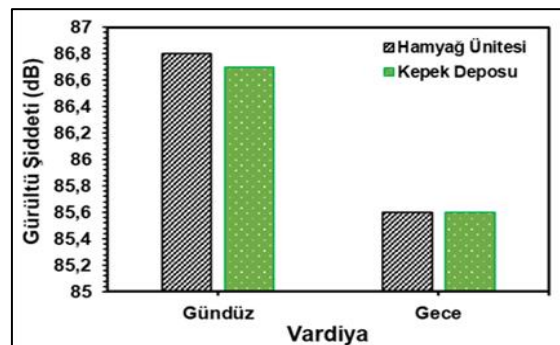
Şekil 5’de ham yağ ünitesi, işçi servisi biniş ve iniş (fabrika girişi) noktalarının gündüz ve gece gürültü şiddeti değerleri verilmiştir. Çalışanların gündüz ve gece maruz kaldığı ortalama gürültü şiddeti, servise biniş noktasında sırasıyla, 78,3 ve 68,47 dB, fabrika girişinde sırasıyla 78,70 ve 71,5 dB ve ham yağ deposunda ise 86,80 ve 85,60 dB olarak ölçülmüştür.



**Şekil 5.** Ham yağ ünitesi çalışanlarının maruz kaldığı gündüz-gece gürültü şiddeti dağılımı

Şekil 4 ve 5’de gürültü şiddetinin gündüz ve gece birbirinden farklı şiddetlerde olduğu görülmüştür. Bu farkların gündüz ham madde alımı gerçekleştiği için kepek deposuna ve ham yağ ünitesine yakın alanlarda ağır tonajlı araçlardan oluşan vasıta trafiği ve tesisin yakınında bulunan şehirlerarası karayolu trafiğindeki artıştan kaynaklandığı belirlenmiştir.

Şekil 6’da ham yağ ünitesi ve kepek deposunun gündüz ve gece gürültü şiddetleri karşılaştırılmıştır. Kepek deposu ve ham yağ ünitesi ortalama gürültü şiddeti değişimi sırasıyla, gündüz için 86,7 dB ve 85,6 dB ve gece için 86,8 dB ve 85,6 dB olarak ölçülmüştür. Bu değerlerin en düşük ve en yüksek maruziyet eylem değerlerinin çok üstünde oldukları tespit edilmiştir.



**Şekil 6.** Ham yağ ünitesi ve kepek deposunun gündüz-gece vardiyası için gürültü şiddeti dağılımı

Şekil 6'da ham yağ ünitesi ve kepek deposunun gündüz ve gece için gürültü şiddetinin birbirinden farklı şiddetlerde olduğu belirlenmiştir. Gündüz fabrika içinde kepek deposuna yakın bir bölge civarından ham madde alımı için ağır tonajlı araçlardan oluşan vasıta trafiğinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Ayrıca, tesisinin yakınında bulunan şehirlerarası karayolundaki trafik artışın gündüz gürültü şiddetinin artmasına neden olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, gündüz fabrika içindeki trafik artışı ile ortamda ki gürültü şiddeti seviyesi artarken gece hammadde alımı yapılmadığı için gürültü şiddeti de önemli bir şekilde azalmaktadır. Bununla birlikte, ham yağ ünitesi yakınında bulunan karayolu araç trafiğinin de azalması ile gürültü şiddeti fabrika içinde önemli ölçüde azalmaktadır. Gündüz-gece gürültü şiddetinin çalışanların bindikleri ve indikleri fabrika girişindeki 80 dB sınırın altında kaldığı ve işçiler için risk oluşturmadığı belirlenmiştir. Ancak, ham yağ ünitesinde gündüz gürültü şiddetinin 86,8>85 dB ve gece ise 85,6 > 85 dB'lik ile en yüksek maruziyet eylem değerinde olduğundan çalışanların sağlığı üzerinde ciddi bir risk oluşturduğu tespit edilmiştir. Çünkü, bu gürültü "Çalışanların Gürültü İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelikte" belirtilen 80/85 dB'lik en düşük/en yüksek sınır maruziyet değerlerinin çok üstünde olduğu için çalışanların sağlığını olumsuz şekilde etkileyen bir gürültü şiddetidir. Gündüze göre, gece gürültü şiddetinin azalmasının nedeninin şehir içi trafiği ve diğer gürültü kaynaklarının azalmasından kaynaklandığı saptanmıştır.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, işyeri İSG sınırları içerisinde sayılan bazı önemli ortamlarda gürültü ölçümleri yapılmıştır. Bir endüstriyel tesiste vardiyalı çalışmaların yapıldığı "kepek deposu" ve "ham yağ ünitesi" için gündüz ve gece vardiyasında çalışanların gürültü algı yanılığının belirlenmiştir. Gürültü algı yanılığının neden olan sorunlar tespit edilmiştir. Ayrıca, endüstriyel gürültünün çalışanlar üzerinde sadece işitme kaybına yola

açmadığı aynı zamanda fizyolojik ve psikolojik risklerin iş performansını da olumsuz etkilediği ve çalışanların yüksek gürültüye maruz kalması sonucunda, kişide zamanla konuşma ve iletişim bozukluğu gibi kalıcı bir işitme kaybına yol açabileceği görülmüştür. Gürültüye bağlı işitme kaybı, kümülatif bir süreçtir. İşitme kaybını belirleyen faktörler arasında genel gürültü seviyeleri, gürültünün bileşimi, tipik bir iş günü boyunca maruz kalma süresi ve çalışanın çalışma geçmişini yer alır. Gürültüye bağlı işitme kaybı, maruz kalan kişilerde rastgele meydana gelir. Bazı kişiler, gürültüye bağlı işitme kaybına diğerlerinden daha duyarlıdır. Kalıcı işitme kaybı, belirli iç kulak yapılarının hasar görmesinden kaynaklanır. Bu hasar tamir edilemez ve kalıcı olabilir.

Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında öneriler ise şunlardır:

- Tespit edilen gürültülü ortamlarla ilgili değişen koşullar ve çalışma şartlarına uygun olarak işverenin ortam ölçümlerini yaptırması ve ortam koşullarına uygun tedbirlerin alınmasını sağlamalıdır.
- İşitme kaybı, gürültü şiddeti ve gürültüye maruz kalma süresine bağlı olarak değişir. Gürültülü ortamlarda çalışanların yıllık olarak yapılan odyometrik testlerinin sonuçları incelenerek çalışanların eşik kayması desibel (dB) olarak ölçülerek işitme kaybı belirlenmelidir.
- Çalışanların işitme kaybında herhangi bir değişiklik varsa çalışanlar fark etmeden önce değişiklikler tespit edilmelidir.
- Erken teşhis, çalışanlar üzerinde daha fazla hasar oluşmadan önce işyerinde değişikliklerin başlatılmasına yardımcı olabilir.
- Gündüz ve gece vardiyalarında önemli risklerden biri olan gürültü ilgili işveren tarafından gürültüyü kaynağında yok edecek önlemler alınmalıdır.
- Gürültüyü kaynağında yok etmek mümkün değil ise ikame yani, daha az riskli olan teknoloji ile değiştirilmelidir.

- İkame mümkün değil ise mühendislik önlemleri alınmalıdır. Eğer, bu mümkün değil ise toplu korunma önlemleri alınmalıdır.
- Kepek deposu ve Ham yağ ünitesinde çalışanların mutlaka kulak koruyucusu olarak kulaklık takması sağlanmalıdır [15].
- Yukarıda belirtilen hususların hiçbiri yapılamıyor ise çalışanlara ortamdaki gürültü riskine uygun, “Kişisel Koruyucu Donanım (KKD)” kullanması sağlanmalıdır [16].
- Ayrıca, alınan tedbirlerin uygulanması için bir kontrol mekanizması oluşturulmalıdır.
- Gece ve gündüz vardiyalarında ilgili gürültülü bölümlere özgü gürültünün insan sağlığı üzerindeki oluşturacağı olumsuz etkileri konusunda işe başlamadan önce uyarı niteliğinde çok kısa işbaşı eğitim programı yapılmalıdır [19]. Ayrıca, mevcut riskler ile ilgili verilen eğitimler afişler ve eğitici videolar ile desteklenmelidir.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tesislerinde yapılmasına izin veren Sunar Grup bünyesindeki Sunar Mısır Entegre Tesisleri Yönetimine Yazarlar teşekkür eder.

## 6. KAYNAKLAR

1. 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 2012. Resmi Gazete Sayısı: 28726.
2. Ferri, P., Guadi, M., Marcheselli, L., Balduzzi, S., Magnani, D., Di Lorenzo, R., 2016. The Impact of Shift Work on the Psychological and Physical Health of Nurses in a General Hospital: A Comparison Between Rotating Night Shifts and Day Shifts. Risk Management and Healthcare Policy, 9, 203–211.
3. Dodia, P., Parashar, N., 2020. Shift-work Job Stress, Psychological Distress, and Job Satisfaction Among Employees. International Journal of Indian Psychology, 8(3), 1215-1223.
4. Vogel, M., Braungardt, T., Meyer, W., Schneider, W., 2012. The Effects of Shift Work on Physical and Mental Health. J Neural Transm, 119, 1121–1132.
5. Chao, P.C., Juang, Y.J., Chen, C.J., Dai Y.T., Yeh, C.Y., Hu, C.Y., 2013. Combined Effects of Noise, Vibration, and Low Temperature on the Physiological Parameters of Labor Employees. Kaohsiung Journal of Medical Sciences. 29(10), 560-567.
6. Selvi, Y., Özdemir G.P., Özdemir, O., Aydın, A., Beşiroğlu, L., 2010. Sağlık Çalışanlarında Vardiyalı Çalışma Sisteminin Sebep Olduğu Genel Ruhsal Belirtiler ve Yaşam Kalitesi Üzerine Etkisi. Düşünen Adam Psikiyatri ve Nörolojik Bilimler Dergisi, 23, 238-243.
7. Koçak, E.B., 2014. Aselsan’ın Vardiyalı Çalışma Sisteminin Fiziksel, Psikolojik ve Dikkate Dayalı Performans Kriterleri Üzerindeki Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği, Ankara, 159.
8. Sevindik, D., 2016. Vardiyalı Çalışmada İş Sağlığı ve Güvenliği. Yüksek Lisans Tezi, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Ana Bilim Dalı, Ankara.
9. Gök, D.K., 2017. Vardiyalı Çalışanlarda Uyku Kalitesi ve Parasomni Sıklığı. Uzmanlık Tezi, Çukurova Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Nöroloji Ana Bilim Dalı, Adana.
10. Akeloğlu, S., 2018. Vardiyalı Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Bilinç Düzeylerinin Ölçülmesi ve Bir Gıda Fabrikasındaki İyi Uygulama Teknikleri. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Adana.
11. Kırtız, G., 2018. İşçilerin Vardiyalı ve Vardiyasız Sistemde Çalışmasının Beslenme Durumu Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Okan Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Beslenme ve Diyetetik Ana Bilim Dalı, İstanbul.
12. Boğurcu, H., 2019. Vardiyalı ve Vardiyasız Çalışan İşçilerin Depresyon, Anksiyete ve Stres Durumları ile Etkileyen Faktörlerin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Halk Sağlığı Ana Bilim Dalı, İzmir.
13. Çetin, İ.A., 2019. Gece Vardiyasında Çalışan Hemşirelerin Meme Kanseri Risk Düzeyi ve Uyku Kalitesi Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sivas

- Cumhuriyet Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Cerrahi Hastalıkları Hemşireliği Ana Bilim Dalı, Sivas.
14. Bağır, A., 2019. Vardiyalı Çalışanlarda Uyku Sorunları ve İş Tatmini Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Psikiyatri Anabilim Dalı, Van.
  15. Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik, Resmi Gazete: 28.07.2013/28721.
  16. Kişisel Koruyucu Donanımların İşyerlerinde Kullanılması Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete: 02.07.2013/28695.
  17. www.google.map (Erişim tarihi: 5.5.2021)
  18. www.pce-instruments.com (Erişim tarihi: 20.02.2021).
  19. Acar, M. Z., 2021. Bir Endüstriyel Sanayide Vardiyalı Çalışmalarda İş Sağlığı ve Güvenliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Adana



## Improving Digital Image Quality for Convolution Neural Network Based Computer-Aided Diagnosis (CNN-CAD) of Skin Cancer

Tolga YALÇIN<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-6185-7559

Amira TANDİROVİC GÜRSEL\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-9219-3203

<sup>1</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Electrical and Electronics Engineering Department, Adana

Geliş tarihi: 16.06.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

*Atıf şekli/ How to cite: GÜRSEL, A.T., YALÇIN, T., (2021). Improving Digital Image Quality for Convolution Neural Network Based Computer-Aided Diagnosis (CNN-CAD) of Skin Cancer. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 1099-1110.*

### Abstract

The practice of detecting skin cancer is based primarily on a visual examination by a dermatologist, followed by a series of tests for a more accurate diagnosis. The concept “the earlier cancer is detected in its natural history, the more effective the treatment is likely to be” is also valid for skin cancer. Hence, any delayed or missed diagnosis can lead to a more severe clinical stage or, what's worse, death. On the other hand, the lack of biomarkers in clinical use brings about overdiagnosis and unnecessary biopsies. DL-CAD system seems to be an excellent candidate for improving diagnostic accuracy and reducing unnecessary treatments. However, the vast majority of conventional CADs manipulate dermoscopic images, which require not only costly equipment but also time-consuming processing. Despite the difficulties with precision, state-of-the-art DL-CAD systems provide an interpretation using digital images, requiring no expertise in cost-effective dermoscopic image capture and interpretation. Pre-processing methods play a crucial role in solving this problem. This study presents results with regard to pre-processing steps to improve the images to be used in the diagnosis of the 5 most common skin cancer types for the proposed CNN based ResNet50 deep learning model. To the best of our knowledge it is the first time that ResNet50 deep-learning model has been utilized in diagnosis of skin cancer.

**Keywords:** Skin cancer, CNN-CAD systems, Dataset augmentation, Image pre-processing, Median filter

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Amira Tandirovic Gursel, [agursel@atu.edu.tr](mailto:agursel@atu.edu.tr)



## **Cilt Kanseri Teşhisi için Konvolüsyonel Sinir Ağları Tabanlı Bilgisayar Destekli Tanıda (CNN-CAD) Dijital Görüntü Kalitesinin İyileştirilmesi**

### **Öz**

Cilt kanserini tespit edilmesi öncelikle bir dermatolog tarafından yapılan görsel muayeneye ve ardından daha doğru bir tanı için bir dizi teste dayanmaktadır. "Kanser doğal geçmişinde ne kadar erken tespit edilirse, tedavinin o kadar etkili olması muhtemeldir" kavramı cilt kanseri için de geçerlidir. Bu nedenle, gecikmiş veya kaçırılmış herhangi bir tanı daha ağır bir klinik aşamaya veya daha da kötüsü ölüme yol açabilir. Öte yandan, klinik kullanımda biyomarker eksikliği aşırı tanı ve gereksiz biyopsileri beraberinde getirmektedir.

DL-CAD sistemleri tanısal doğruluğu artırmak ve gereksiz tedavileri azaltmak için mükemmel bir aday gibi görünmektedir. Bununla birlikte, geleneksel CAD sistemlerin büyük çoğunluğu, yüksek maliyetli ekipmanın yansırı işlenmesi zaman alan dermoskopik görüntüleri kullanır. Hassasiyet hususundaki zorluklara rağmen, modern DL-CAD sistemleri, dijital görüntüleri kullanarak bir yorumlama sağlar ve uygun maliyetli dermoskopik görüntü yakalama ve yorumlamada uzmanlık gerektirmez. Ön işleme yöntemleri bu sorunun çözümünde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışma, önerilen CNN tabanlı ResNet50 derin öğrenme modeli için en yaygın 5 cilt kanseri türünün teşhisinde kullanılacak görüntülerin iyileştirilmesine yönelik ön işleme adımlarına ilişkin sonuçları sunmaktadır. Bildiğimiz kadarıyla, cilt kanseri tanısında ResNet50 derin öğrenme modeli ilk kez kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Cilt kanseri, CNN-CAD sistemleri, Veri kümesi büyüme, Görüntü ön işleme, Medyan filtresi

### **1. INTRODUCTION**

According to the latest annual report of the World Health Organization (WHO) as well as data sheets of Global Cancer Observatory (GCO), cancer, with about 10 million deaths in 2020, is the second leading cause of death worldwide [1-2]. Skin cancer, which is by far the most common cancer type regardless to gender, can be defined as the uncontrollable growth of abnormal cells due to permanent DNA damage in the outermost skin layer, epidermis[2]. The continued increase in prevalence of the skin cancer in the last decade is believed to be caused by factors such as prolonged and periodic exposure to UV radiation, changes in social habits, a decrease in the thickness of the ozone layer and climate changes [3-4].

Skin cancers can be categorized as basal cell carcinoma of the skin (BCC), squamous cell carcinoma of the skin (SCC), melanoma skin cancer (MEL), Merkel cell carcinoma of the skin (MCC), lymphoma of the skin (LS) and Kaposi

Sarcoma (KS), according to the skin cell in which cancer develops. However, the most common categorization is the basic division into two groups: melanoma skin cancer (MEL) and non-melanoma skin cancer (NMSC). Although BCC is a NMSC and one of the most common forms of skin cancer, MEL is more likely to grow and spread indirectly promoting higher mortality rates [5-6]. In the last decade, the number of patients diagnosed with newly invasive melanoma has increased by an average of 44%. According to the American Cancer Society (ACS), it is estimated that more than 7 thousand people in the United States will die of melanoma skin cancer in 2021. Although the risk is in correlation with aging, with an average age of diagnosis of 65, melanoma is not uncommon in young adults, especially young women [7]. Relying on information from the SEER database providing survival statistics for different types of cancer, used by the ACS, it is to be pointed out that 5-year relative survival rates decrease from 99%, for localized stage, to 27%, for distant stage. Although it is underlined that

these numbers don't take everything into account, there is no doubt the early detection and diagnosis play a crucial role in decreasing mortality [8-9]. Skin cancer detecting practice is predominantly based on a visual inspection by a dermatologist, followed by a series of tests to diagnose the disease. However, in several studies discussed about the accuracy of visual inspection alone addressing the high error rates it has been highlighted that diagnosis can be missed if visual inspection is used on its own [10]. It has been also pointed out that apart from improving the expertise of clinicians, this field should benefit more from new technologies and tools [11-12]. In this context, deep learning based computer aided (DL-CAD) systems seem to be a great candidate for improving the diagnostic accuracy. Since the first conventional CAD system to be approved in mammography in 1998, these systems have made significant progress especially in the diagnostic imaging area. However, several challenges attributed to conventional CAD systems, such as high development costs, high rates of false positive ratings, and limitations to specific lesions, have hampered widespread access in clinical settings. State-of-the-art DL CAD systems seem to offer better solutions to these problems than their predecessors,

This paper, focused on image pre-processing methods and techniques for a Convolutional Neural Network (CNN)-CAD system that is proposed to detect skin cancer, is organized as follows: Section 2 gives the general frame of the proposed model with valuable information about the dataset for the detection of skin cancer while Section 3 turns on the pre-processing methods for image filtering used in the study. In Section 4, we share the results obtained by pre-processing the digital images for the proposed CNN-CAD system. In Chapter 5, the shared results are discussed from the perspective of future studies.

## 2. METHODOLOGY

In the last decade, thanks to not only significant increase in our knowledge about human anatomy and physiology but also advances in computer technology as well as quite successful transference

to the medical field, DL-CAD systems have become one of the most powerful assisting tools in diagnosis. Despite some challenges in precision, important features, such as the efficiency of image classification and object localization in images, have raised awareness of the great potential of DL-CAD systems in early cancer diagnosis and created a fertile environment for multidisciplinary research [13-14]. Among several models for digital image classification CNN stays one step ahead primarily because of its ability to reduce the number of parameters it contains without losing the image quality.

Generally speaking, DL-CAD systems for diagnosing cancer, and melanoma is no exception, are recipes that consist of a few steps, and the output determines whether the area in the image looks suspicious. These steps can be ordered as follows: image capture, pre-processing, processing, classification, and declaration of results. Figure 1 shows a flow diagram of the proposed DL-CAD system during the training process, with important details related to the steps and highlighted pre-processing procedure.

Fulfilment of requirements largely depends on the proper functioning of the CAD system, which is not possible without a properly selected and defined dataset for training. Images available from data libraries on skin cancer of public image databases are basically categorized into two separate groups: dermoscopic and clinical (non-dermoscopic) images. Dermoscopic images are obtained by examining skin lesions with a dermatoscope that allows the inspection of skin lesions with unobstructed reflections on the skin surface, while clinical images are digital images obtained by taking a photograph with any digital camera. Due to the higher image quality, dermoscopic images provide more accurate detection. However, disadvantages, such as expensive equipment and time-consuming processing as well as the requirement for interpretation by a dermatologist specialized in this field, are the major obstacles for wider applications. On the other hand, recent advances not only in digital image collection methods but also in post-processing techniques, bringing in

flexibility in integration with some disruptive technologies, such as Artificial intelligence and health information system, have opened the door for low-cost real-time diagnosis. Naturally, digital

imaging has become a hot topic for the scientific community. One of the important indicators of this attention is the growing presence of digital images in public databases.

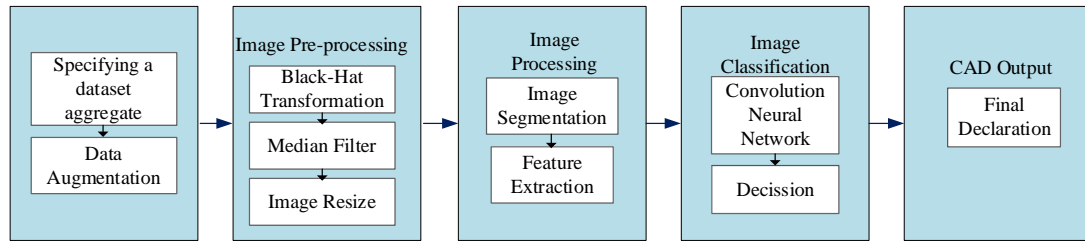


Figure 1. Flowchart of the proposed CAD system

The dataset of non-dermoscopic images used in this study, taken from The International Skin Imaging Collaboration (ISIC), was created for ISIC 2019 challenge [15-18]. As it shown in Figure 2, according to the type of disease the images can be divided into 8 categories: Basal cell carcinoma (BCC), Melanoma (MEL), Squamous cell carcinoma (SCC), Vascular lesion (VASC), Dermatofibroma (DF), Actinic keratosis (AK), Benign keratosis (solar lentigo / seborrheic keratosis/lichen planus-like keratosis) (BKL), and Melanocytic nevus (NV) [18-19]. It is to be noted that, BCC, MEL, and SCC are Cancerous tumours, while the others are Benign (Non-Cancerous) Tumours.

The difference in the representation of images in selected groups is one of the main training challenges resulting in sensitivity regarding representation weight affects the diagnosis accuracy. That is, the smaller groups are less likely to be predicted correctly. To settle this matter, we proposed a data augmentation algorithm that produces new images by modifying existing images. The procedure of obtaining new images, reaching up at least 5,690 images per group, is as follows: the algorithm selects the digital images from the group and rotates the image 180 degrees, before the image is restored to its original size by cutting the suspicious area at a rate of 0.1 from all sides and zooming in 0.1 as the centre. Image distributions of both the training set and testing set are represented in Table 1.

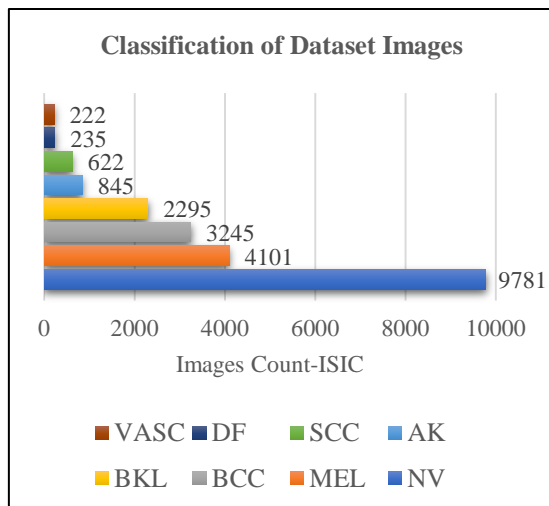


Figure 2. The classification of ISIC dataset

Table 1. Image distribution of datasets

	NV	MEL	BCC	SCC
Training Dataset	7956	6037	6001	5690
Testing Set	447	280	448	126

### 3. PRE-PROCESSING

Despite numerous technical advantages, raw digital images are not suitable for usage in classification algorithms for cancer diagnosis. The main obstacles in direct using are: noise generated during the process and existing of multiple undesirable structures, such as air bubbles, and hair. The image enhancement is implemented through both image clearing, de-noising and

resizing, for subsequent image analysis and understanding.

Adequate image pre-processing requires knowledge about skin cancer diagnosis. There are several important criteria to be taken into consideration in the selection of the image enhancement methods. First of all, the lesions related to skin cancer usually have small and sharp lines. The other important criterion is the colour of the lesion. Hence, characteristics such as colour variations and size of the image need to be preserved. On the other hand, the image resolution and sizing are required for future stages.

According to the research, there are several methods currently used for pre-processing in skin cancer diagnosis. Some of them are represented in [20-21]. In this study, we used one most popular ones, which can be defined through 3 steps: Black-Hat transformation is used for hair removal, denoising and contrast enhancement are provided by Median Filter, while the image re-sizing is utilized to improve the quality and make all images one size.

### 3.1. Black-Hat Transformation

The difference image of the original image and its morphological closing refer to as black-hat operation and it is expressed mathematically as (Equation 1):

$$T_b(f) = f \bullet b - f \quad (1)$$

where,  $f$  is the function of the original image,  $b$  is a structuring element, and  $\bullet$  is a closing operator. Separating and highlighting not only the objects smaller than structuring element but also the darker area from the area around the original outline, black-hat transform offers quite improved contours of the renderings.

The main reason why the Black-Hat method is preferred that after the cleaning process is done, a regional dyeing process is performed by adhering to the original colours of the digital image. Black-Hat is a method used to remove hair from a digital image, by finding the hair in the image and replacing the hair with the colour values in the

nearest pixels [21-22]. This pre-processing step is vital to ensure that the method used in the segmentation process makes satisfactory predictions.

### 3.2. Median Filter

Filters for noise cleaning have a very important place in image pre-processing. Regarding to image pre-processing for skin cancer detection, the filters commonly used are: Adaptive Median filter[22], Median filter[23], Gaussian smoothing[24], and Average filters[25]. Because, filtering can be viewed as a trade-off between improving the quality of the image and losing fine information, the filter is chosen or more often adapted according to the requirements for future applications. Among several aspects to be considered, the type of image, as well as the distribution of noise to be processed, are the most prominent ones. From a point of view of skin cancer detection, the applied filter has to protect the sharp edges in the same way while cleaning the digital image, predominantly degraded by salt-and-pepper noise, which is non-linear in origin.

Apart from simple operation methodology, the median filter provides very fast and effective cleaning of some specific types of noise, as speckle and pepper noise, without damaging the edges of the digital image [26]. Since most skin cancers, especially melanoma, consist of nodule structures, some of the properties used to distinguish them are found in borders. Therefore, it is vital that border structures are protected without deterioration in order to make an accurate diagnosis. All of the aforementioned advantages make the median filter an appropriate candidate for de-noising. The basic working principle of the median filter is that it divides an image into pixels and works on all of them separately, replacing each pixel with the median of neighbouring pixels. Specifically, the median filter replaces just one neighbouring ( $w$ ) pixel using the median instead of the average of all pixels in a region (Equation 2);

$$y[m,n]=\text{median} \{ x [i , j], (i, j) \in w \} \quad (2)$$

where  $w$  represents an area defined by the system or user and centered around the  $[m, n]$  position [27].

As in order statistics, the input values of the current filter window are ranked in numerical order and a median value of those is assigned to the output cell. Since the median value is not affected by the actual value of the noise cells, the Median filter behaves as a nonlinear filter and is especially successful in removing isolated random noise making it preferable among the counterparts in this example. It should be emphasized that, although it retains the edges and features of the line better than either Average or Low-pass filter, the Median filter produces some blurring.

### 3.3. Image Resize

The images in the data set are of different sizes and resolutions and are usually i.e. 1024, 1024, 450, 600 etc. resolution. In order to make a healthy determination, it is important to reconstruct the dimensions and bring them to the same dimensions. First of all, the images cleaned from the hairs with the Black-Hat method were cleared of the images with the median filter, and finally, their size was changed to 224x224 and prepared for the processing stage. The reason for choosing these sizes is that while maintaining the large image quality, it has been tried to reduce it because large sizes cause the training phase of the program to be prolonged.

In the conclusion part, it is important to explain the following two concepts for a more detailed examination of the model. Recall can be briefly defined as follows: It is a metric that shows how much of the transactions we need to predict as positive as a result of classification, we predict as positive. It should be as high as possible (Equation 3).

FN=False Negative, TP=True Positive, FP=False Positive

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

The precision shows how many of the values we predicted as positive are actually positive. The precision value is a metric to be considered especially if the cost of returning the error made with false-positive estimation to you is very high. Therefore, the high precision value of the model we will choose is an important criterion.

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (4)$$

## 4. RESULTS

This section is organized in the following order. In the first part, we present the results related to the process of obtaining new images for a data set. The second part of the section deals with image pre-processing, which is done in three steps: black-hat transformation, reconstruction by the Meridian filter, and resizing. At the end, in order to demonstrate the effectiveness of the proposed preparation of the image, we put forward training results with and without pre-processing. The results of the proposed data augmentation algorithm are represented in Figure 3. The original image is shown in Figure 3(a), while the images shown in Figure 3(b)-(d) represent the images obtained by proposed augmentation methods, explained in the methodology section.

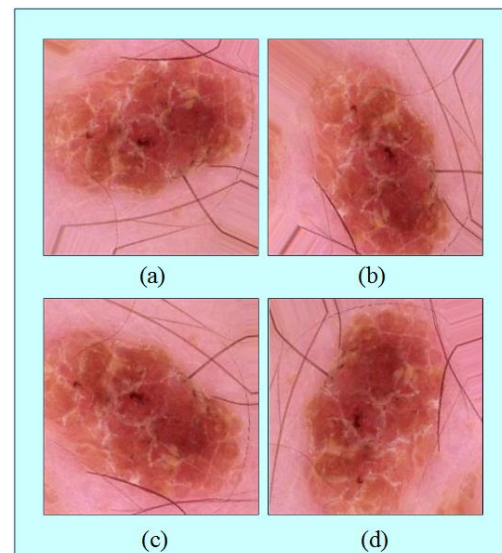
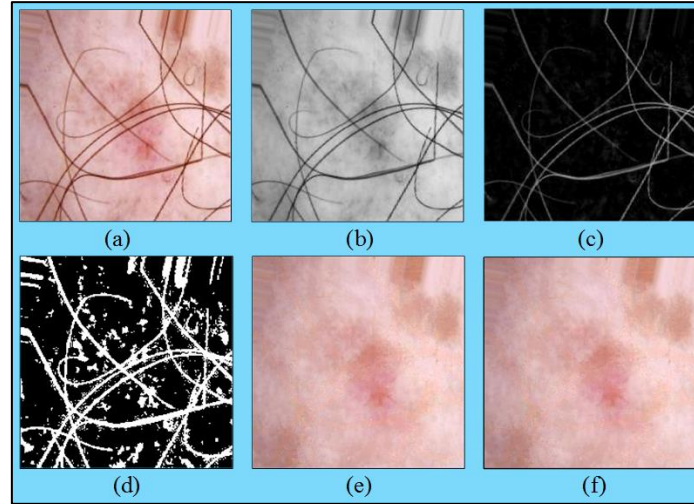


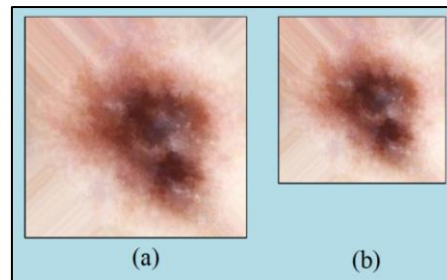
Figure 3. Examples of the proposed augmentation



**Figure 4.** Black Hat Transformation and Image Filtering: (a) Raw image, (b) Grey-Scaling, (c) Black-Hat masking, (d) Image thresholding, (e) Re-Painting, (f) Image denoising by Median filter

Black-Hat method, the steps of which shown through Figure 4(a)-4(e), removes fine hairs in the image as follows: First, the original image is converted to grayscale (Figure 4(b)), which creates a core for Morphological filtering, using Black Hat filtering on the grayscale image to find the Hair contours. Effects of Morphological filtering on the images are presented in Figure 4(c). It prepares the image for the efficient and sharp operation of the in-painting algorithm by intensifying the lines in the area where the hairs are located, as it shown in Figure 4(d). Finally, Figure 4(e) represents results after the hairs are removed staining while the image remains true to its original colours. It is to be pointed out that enhance image is still blurred and contaminated by noise.

The median filter is not only very effective at removing small bubbles, noise contained in the image and pixels that are independent of other parts, but also preserves the spatial resolution in the image. Results related to image denoising by the median filter are shown in Figure 4(f). Comparing images of Figures 4(e) and 4(f), it can be said that the most salient differences between the two images are the softer transitions and evidently decrease in the number of white small dots, while the depth perception and colours are preserved.



**Figure 5.** Resizing of the image: (a) Raw image, (b) Resized image

Finally, as it is fairly certain that image size diversity affects the algorithm accuracy, all images are resized to 224x224. Example resizing is shown in Figure 5, The image of Figure 5(a) where the image is 450x600 dimensions and 5(b) where original image resized to 224x224. In order to reveal the importance and necessity of pre-processes in digital image processing and classification programs, we wrote a CNN-based skin cancer identification algorithm, examining and classifying image dataset that consist of 4 groups named NV, BCC, SCC, MEL.

Applying the above-mentioned methods, we prepared the algorithm for training and obtained training and validation accuracies for the raw

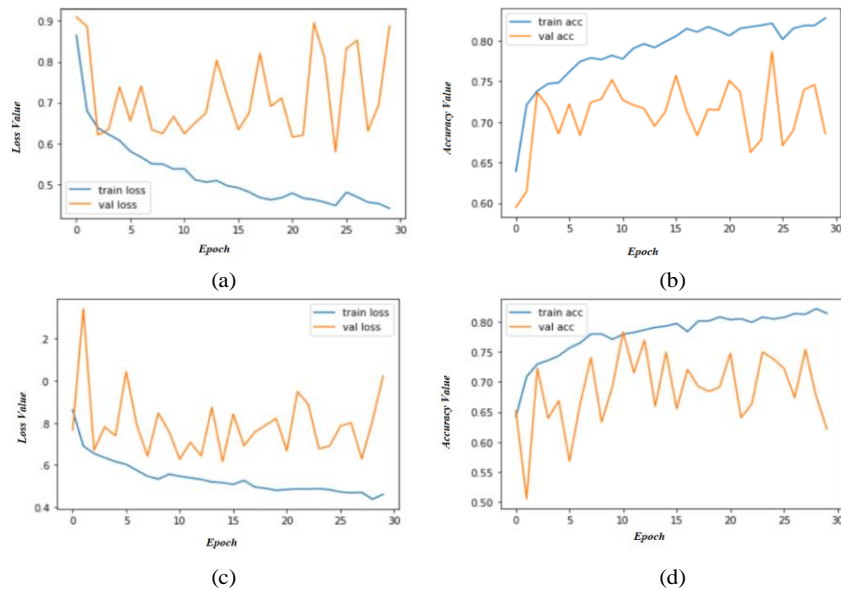
digital images as well as the pre-processed images. The results of training with the raw images are shown in Figure 6(a) to 6(b), while results represented in Figures 6(c) and 6(d) are related to accuracy and loss of the pre-processed images.

When raw digital images are used, our algorithm runs an average of 40 seconds slower for each epoch. This result may be negligible for small size operations. However, when large data processing is required, it will not only create a huge load on the system but also force the systems to use more resources and energy. In today's world, energy efficiency and speed are undeniably important.

Additionally, from Figures 6(a)-6(b) it can be seen that use of the raw images lead to more unstable epoch, which is an important indicator of the unstable system. Also, the very high exchange between each epoch proves that it is an unstable and unhealthy system. In addition to this, it can be observed from Figure 6(c), which is pre-processed and uses digital data free from noise and pollution, is much better and more stable in the loss part as

well as working regularly. In machine learning, loss values are very important as well as accuracy. The reason for this is that the lost data shows us how stable it works actually and how efficiently it can read the data. Looking at it from this perspective, we can better understand the importance of pre-processing in digital data processing.

In order to obtain the performance of the proposed pre-processing methods on the sensitivity of the program according to the groups as well as to make more correct judgments on shortages of the proposed model, we formed a confusion matrix of the model. The two confusion matrices, shown in Figures 7(a) and 7(b), summarize results before and after the image pre-processing. Each row corresponds to the instances of an actual class, while each column represents an entry for a predicted class. Additionally, all correct predictions are located in a diagonal line, while off-diagonal cells correspond to incorrectly classified observations.



**Figure 6.** Training results: (a) The validation and training losses for each epoch with raw images. (b) The validation and training accuracy for each epoch with raw images. (c) The validation and training losses for each epoch with pre-processed digital images (d) The validation and training accuracy for each epoch with pre-processed digital images



Comparing the confusion 1 matrices, it can be said that, from the general point of view, training with pre-processed images makes a more stable and accurate prediction. That is to say, suppressing the noise and getting rid of hairs found in digital images at one and the same time adjusting the sharpness of the shape and the colour gradations increases the selectivity to malign images. According to the proposed groups, in both matrices, the best accuracy is achieved for NV whereas the poorest results are recorded for SCC. Moreover, in all groups except SCC, there is undoubtedly a positive impact of the pre-processing. However, it is to be pointed out that, in both cases, both BCC and MEL are the most frequently confused with SCC. The main reason for the confusion is a lot of structural similarities between those groups. This problem will be solved by giving better prominence to determinant

differences of the groups during the processing procedure. Although the accuracy rates of our model are still poor for usage in daily life, it should be remembered that pre-processing is not a final procedure. Its real purpose is to prepare the images for the next stage, to speed up not only the training but also the decision-making period, as well as increase efficiency and precision.

The sensitivity and precision results are shown in the tables below. When looking at the total results, we can observe that the model trained using pre-processed pictures produces better outcomes in both categories. When examining the model in depth on the basis of groups, can see that the model is more stable and the transition between groups is more balanced as a result of the pre-processed images.

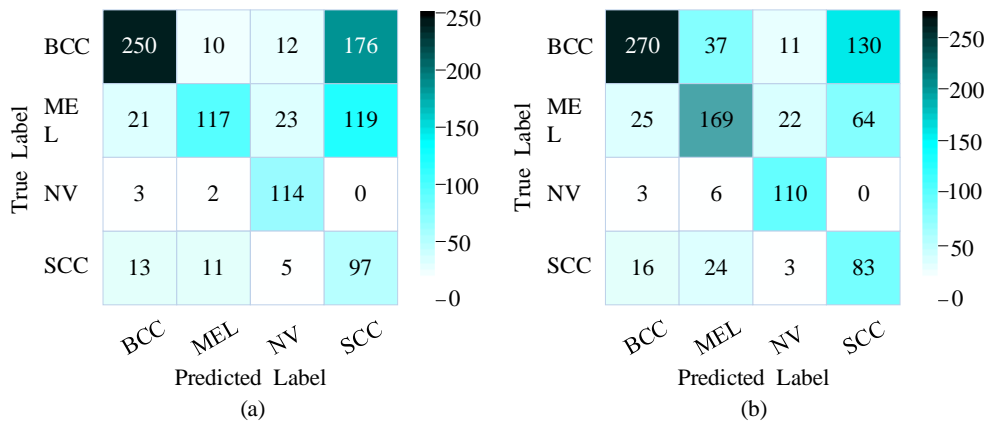


Figure 7. Confusion matrices

<i>Pre-Processed Image Model/Results</i>	RECALL	PRECISION	<i>Raw Image Model/Results</i>	RECALL	PRECISION
<i>BCC</i>	0.6028	0.8698	<i>BCC</i>	0.5580	0.8710
<i>MEL</i>	0.6035	0.7524	<i>MEL</i>	0.4178	0.8357
<i>NV</i>	0.9258	0.7534	<i>NV</i>	0.9579	0.7402
<i>SCC</i>	0.6642	0.30	<i>SCC</i>	0.77	0.1509
<b><i>Total</i></b>	0.6990	0.6689	<b><i>Total</i></b>	0.6759	0.6494

Figure 8. Precision and Recall tables

## 5. CONCLUSION

Advantages, such as less reliance on feature extraction, direct learning from input data, less need for consistent equalization engineering, and, the most important, utilizing digital images, make CNN-CAD systems powerful candidates in skin cancer diagnosis. In comparison to dermoscopic images, digital images offer lower-costs and less-complex systems. However, digital images suffer from various types of noise, which affects the accuracy of proposed models. Hence, there is a strong requirement for less-noisy digital images with well-preserved edges, which are of vital importance in distinguishing melanoma from benign tumours as well as other cancer types.

Up to now, the CADs systems have employed primarily 2-group or 3-group classifications. In the two-group classification, the digital images are classified as cancer or not, while the three-group classification groups the images as melanoma cancer, non-melanoma cancer, and non-cancer. The proposed CADs system not only increases the number of classes to four but provides a good basis for more exhaustive classification.

There have been several research studies on the relevance of pre-processing for image analysis, but none have specifically addressed the skin cancer group. Unlike the others, no Feature Extraction was done while classifying in this research since the purpose is to investigate the influence of pre-processed pictures on classification outcomes. As a consequence, the study's accuracy findings may appear to be low, but it should be noted that the major goal here is to assess the influence of raw pictures and pre-processing images on the system.

This study provides a comprehensive look at the preparation for processing and analysis of digital images for CNN-CAD proposed for the detection of skin cancer. The process starts with augmentation of the dataset which, providing more extensive training, may help to reduce false-positive and false-negative rates.

Fit for purpose, we multiplied the images in the data set according to certain rules to bring the

number of images in the groups to a certain average. The noise of the proposed digital images mainly manifests itself through hair sounds, white or blue light, or interference with the main source of which the image captured. We try reducing their negative impacts by pre-processing digital images of the public dataset. For the above reasons, we removed hair, unwanted features, and errors during recording using the Black-Hat filter, and in the next step, the sounds within the digital images were destroyed using the median filter. The last issue to be considered in the pre-processing procedure is image equalization. We proposed an adaptive algorithm for reducing all images in size, to avoid errors that could occur due to different image sizes and qualities in the data set.

Our future study will be focused not only on improving both pre-processing and extraction features from digital images, collected from several local hospitals, but also on evolving up the more inclusive algorithm.

## 6. REFERENCES

1. World Health Organization. 2021. WHO Report on Cancer: Setting Priorities, Investing Wisely and Providing Care for All. (Second Edition), Geneva, Wiley.
2. Atlanta American Cancer Society, 2021, Cancer Facts Figures 2021. Atlanta, USA, 13-15.
3. Global Burden of Disease Cancer Collaboration and Others. 2019. Global, Regional, and National Cancer Incidence, Mortality, Years of Life Lost, Years Lived with Disability, and Disability-adjusted Life-years for 29 Cancer Groups, 1990 to 2017: a Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study. *JAMA Oncology*; 5, 1749-1768.
4. Khazaei, Z., Sohrabivafa, M., Mansori, K., Naemi, H., Goodarzi, E., 2019. Incidence and Mortality of Cervix Cancer and Their Relationship with the Human Development Index in 185 Countries in the World: An Ecology Study in 2018. *Advances in Human Biology*, 9(3), 222-227.

5. Avanaki, M.R.N., Hojjat, A., Podoleanu, A.G., 2009. Investigation of Computer-based Skin Cancer Detection Using Optical Coherence Tomography. *Journal of Modern Optics*, 56(13), 1536-1544.
6. Mohan, S.V., Chang, A.L.S., 2014. Advanced Basal Cell Carcinoma: Epidemiology and Therapeutic Innovations. *Current Dermatology Reports*, 3(1), 40-45.
7. Atlanta American Cancer Society. 2020. Cancer Facts Figures 2020. Atlanta, USA, 10-14.
8. MacFarlane, D., Shah, K., Wysong, A., Wortsman, X., Humphreys, T.R., 2017. The Role of Imaging in the Management of Patients with Nonmelanoma Skin Cancer: Diagnostic Modalities and Applications. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 76(4), 579-588.
9. Rat, C., Hild, S., Serandour, J.R., Gaultier, A., Quereux, G., Dreno, B., Nguyen, J.M., 2018. Use of Smartphones for Early Detection of Melanoma: Systematic Review. *Journal of Medical Internet Research*, 20(4), 135-140.
10. Dinnes, J., Deeks, J.J., Grainge, M.J., Chuchu, N., Ferrante di Ruffano, L., Matin, R.N., Thomson, D.R., Wong, K.Y., Aldridge, R.B., Abbott, R., Fawzy, M., Bayliss, E.E., Takwoingi, Y., Davenport, C., Godfrey, K., Walter, F.M., Williams, H.C., Cochrane Skin Cancer Diagnostic Test Accuracy Group, 2018. Visual Inspection for Diagnosing Cutaneous Melanoma in Adults. *Cochrane Database System Review*, 12(12), 1689-1699.
11. Fujita, H., 2020. AI-based Computer-aided Diagnosis (AI-CAD): the Latest Review to Read First. *Radiological Physics and Technology*, 13(1), 6-19.
12. Cetinkaya, E., Kirac, M.F., 2020. Image Denoising Using Deep Convolutional Autoencoder with Feature Pyramids. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 28, 2096-2109.
1. Ebigbo, A., Mendel, R., Probst, A., Manzeneder, J., Souza Jr, L.A., Papa, J.P., Palm, C., Messmann, H., 2019. Computer-aided Diagnosis Using Deep Learning in the Evaluation of Early Oesophageal Adenocarcinoma. *Gut*, 68(7), 1143-1145.
13. Yanase, J., Triantaphyllou, E., 2019. A Systematic Survey of Computer-aided Diagnosis in Medicine: Past and Present Developments. *Expert Systems with Applications*, 138, 112-821.
14. Codella, N.C.F., Gutman, D., Celebi, M.E., Helba, B., Marchetti, M.A., Dusza, S.W., Kalloo, A., Liopyris, K., Mishra, N., Kittler, H., Halpern, A., 2018. Skin Lesion Analysis Toward Melanoma Detection: A Challenge at the 2017 International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), Hosted by the International Skin Imaging Collaboration (ISIC). *IEEE 15<sup>th</sup> International Symposium on Biomedical Imaging*, Washington DC, USA, 168-172.
15. Tschandl, P., Rosendahl, C., Kittler, H., 2018. The HAM10000 Dataset, a Large Collection of Multi-source Dermatoscopic Images of Common Pigmented Skin Lesions. *Scientific Data*, 5, 1-9.
16. Combalia, M., Codella, N.C.F., Rotemberg, V., Helba, B., Vilaplana, V., Reiter, O., Carrera, C., Barreiro, A., Halpern, A.C., Puig, S., Malvehy, J., 2019. Dermoscopic Lesions in the Wild, 1908.02288.
17. Vasconcelos, C.N., Vasconcelos, B.N., 2020. Experiments Using Deep Learning for Dermoscopy Image Analysis, *Pattern Recognition Letters*, 139, 95-103.
18. Steppan, J., Hanke, S., 2021. Analysis of Skin Lesion Images with Deep Learning. *arXiv preprint arXiv:2101.03814*. 2021, 06.06.2021.
19. Vocaturo, E., Zumpano, E., Veltri, P., 2018. Image Pre-processing in Computer Vision Systems for Melanoma Detection. *2018 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine*, Madrid, Spain, 2117-2124.
20. Zghal, N.S., Derbel, N., 2020. Melanoma Skin Cancer Detection Based on Image Processing. *Current Medical Imaging Reviews*, 16(1), 50-58.
21. Hoshyar, A.N., Al-Jumaily, A., Hoshyar, A.N., 2014. The Beneficial Techniques in Preprocessing Step of Skin Cancer Detection System Comparing. *Procedia Journal of Computational Science*, 42, 25-31.

22. Tan, T.Y., Zhang, L., Jiang, M., 2016. An Intelligent Decision Support System for Skin Cancer Detection from Dermoscopic Images. IEEE 12<sup>th</sup> International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Changsha, China, 2194-2199.
23. Sheha, M.A., Mabrouk, M.S., Sharawy, A., 2012. Automatic Detection of Melanoma Skin Cancer Using Texture Analysis. International Journal of Computer Mathematics, 42(20), 22-26.
24. Mishra, N.K., Celebi, M.E., 2016. An Overview of Melanoma Detection in Dermoscopy Images Using Image Processing and Machine Learning, arXiv preprint arXiv:1601.07843.
25. Rhee, K.H., 2017. Median Filtering Detection Based on Variations and Residuals in Image Forensics. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 25, 3811-3826.
26. Jana, E., Subban, R., Saraswathi, S., 2017. Research on Skin Cancer Cell Detection Using Image Processing. IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, Tamil Nadu, India, 1-8.

## Türkiye’de Değişen Yapı Özelliklerinin Karşılaştırmalı İncelemesi

Bekir Özer AY\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-7566-6710

Tuba EROĞLU AZAK<sup>2</sup> ORCID 0000-0002-4799-1580

<sup>1</sup>Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Ankara

<sup>2</sup>Milli Savunma Üniversitesi, Kara Harp Okulu, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş tarihi: 10.05.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: AY, B.Ö., AZAK, T.E., (2021). Türkiye’de Değişen Yapı Özelliklerinin Karşılaştırmalı İncelemesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 1111-1126.

### Öz

Deprem tehlikesi, bir bölgenin sismotektonik yapısıyla ilgili bir konu iken; deprem riski, deprem tehlikesi altındaki yapıların davranışını ele alarak belirli bir zaman dilimi için sismik kayıp ve hasarların aşılma olasılıklarını ifade eder. Bu nedenle, deprem riski hesaplanırken dikkate alınan bölgedeki yapıların deprem davranışını etkileyen özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Türk yapı stoku, zaman içerisinde artan nüfusa cevap verebilmek amacıyla son yıllarda hızla büyümüş, yeni konut iştahı ve değişen sosyoekonomik yapı gibi faktörler etkisinde zamana ve lokasyona göre büyük değişim göstermiştir. Ayrıca, depreme dayanıklı yapı tasarımı ile ilgili yönetmelikler ve inşaat uygulamalarındaki ilerlemeler son yıllarda yapı özelliklerinin değişmesine sebep olmuştur. Bu bağlamda, farklı zaman dilimlerinde inşa edilmiş yapıların yerel karakteristiklerini gerçekçi bir şekilde dikkate alan uygun deprem kayıp modellerinin kullanımı önem kazanmıştır. Ancak Türk yapı stoku ile ilgili çalışmalar bölgesel veya nispeten eski verilere dayalıdır. Bu çalışmada, deprem riski ve kayıp hesaplarında kullanılacak bina bilgilerinin derlenmesi ve bina tipi yapıların temsili modellerinin oluşturulması için gerekli olan istatistiki verinin üretilmesi hedeflenmiştir. Türkiye İstatistik Kurumu tarafından sağlanan 2000 Bina Sayımı verileri ve Yapı İzin İstatistikleri kullanılarak istatistiksel bir araştırma yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu çalışmada incelenen yeni yapı stokunun kullanım amacı, taşıyıcı sistem tipi, dolgu duvar malzemesi ve barındırdığı nüfus oranı özellikleri 2000 Bina Sayımı verileri ile karşılaştırılmış; birleştirilmiş bina veri tabanı üzerinden Türk bina stokunun yıllar içinde gösterdiği değişim ortaya konulmuştur. Sunulan istatistiki veriler deprem risk ve kayıp hesaplarında rahatlıkla kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Türk bina stoku, Deprem riski, Türk yapı stokunun özellikleri, İstatistiksel çalışma

### A Comparative Investigation of Changing Building Characteristics in Turkey

#### Abstract

While seismic hazard is solely related to the seismotectonic structure of the region under consideration, seismic risk further combines earthquake-induced hazard with structural vulnerability and represents seismic loss or damage that is exceeded in a given time period. To this end, for seismic risk assessments, it is essential to acquire properties of the building stock in the subject area. The Turkish building stock

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Bekir Özer AY, [oz@metu.edu.tr](mailto:oz@metu.edu.tr)

has undergone great expansion in the last decades to meet the housing needs of the growing population. It exhibits great changes both in time and from region to region due to several factors such as technological developments and regional differences in construction practice. Moreover, design characteristics have been altered within the last decades because of changing socioeconomic factors and regulations related to earthquake-safe design. In this sense, it is of prime importance to utilize proper earthquake loss models that are able to consider the local characteristics of building stocks built in different time spans in a realistic way. Regarding the Turkish building stock, studies in the literature are relatively limited and are based on quite old data. Therefore, the major goal of this study is to compile general characteristics of Turkish buildings that are believed to be necessary to generate representative building models and perform realistic loss estimations. Accordingly, a statistical survey was carried out on the properties of Turkish building stock using the 2000 Building Census data harmonized with Building Permit Statistics disseminated by the Turkish Statistical Institute. By including the relatively new Turkish building stock, this study compiled information about building properties such as the building use, structural system, infill wall material and the percentage of occupants in the population. These statistics are deemed to be used for earthquake damage and loss estimation studies in Turkey.

**Keywords:** Turkish building stock, Earthquake risk, Characteristics of the Turkish building stock, Statistical study

## 1. GİRİŞ

Bir deprem ülkesi olan Türkiye’de yaşanan büyük depremler yalnızca çok sayıda can kaybına sebep olmakla kalmamış, doğrudan ya da dolaylı ekonomik kayıplar sebebiyle ülke ekonomisine büyük darbe vurmuştur. Resmi kayıtlar, 1999 yılında art arda meydana gelen Kocaeli ve Düzce depremlerinde sırasıyla 17.322 ve 950 kişinin hayatını kaybettiğini göstermektedir [1]. Bu depremlerin sebep olduğu doğrudan ve dolaylı ekonomik kayıpların ise 16 milyar dolara ulaştığı tahmin edilmektedir [2]. Kocaeli ve Düzce depremleri sonrasında, özellikle deprem tehlikesinin fazla olduğu büyük şehirlerde deprem zararlarının azaltılmasına yönelik binaların performans tahkikleri ve güçlendirme/yeniden yapımı konusunda çalışmalar başlatılmış ancak 2003 Bingöl, 2011 Van ve 2020 İzmir depremlerinde önemli can ve mal kayıpları görülmeye devam edilmiştir. Deprem zararlarının azaltılmasına ve afet yönetimine yönelik çalışmaların başarıya ulaşması, deprem sonucunda oluşabilecek kayıpların doğru tahmin edilmesini gerektirir. Deprem kayıplarının gerçekçi bir şekilde tahmini ise deprem tehlikesinin ve bu tehlike altındaki yapıların davranışının doğru bir şekilde tespit edilmesi ile mümkündür.

Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma (PEER) Merkezi deprem tehlikesi hesabından deprem riskine, kayıp tahminine ve karar aşamasına kadar tüm adımların ayrı ayrı analiz edilebileceği ve bağlantı parametreleri ile birleştirilebileceği performans dayalı bir deprem mühendisliği modeli ortaya koymuştur [3]. Bu modelin bileşenlerinden biri de yapıların deprem etkileri altında, seçilen bir mühendislik istem parametresine bağlı hasargörebilirlik eğrilerinin oluşturulmasıdır. Hasargörebilirlik eğrileri tek bir yapı için oluşturulabileceği gibi belli bir bölgenin risk ve kayıp hesaplarında kullanılmak üzere de elde edilebilir. Ancak belirli bir bölge ele alındığında, bu alanda yer alan yapıların ortak özelliklerini dikkate alan ve yapı stokunu en iyi şekilde temsil edebilecek modellerinin oluşturulması, çalışmanın gerçekçi sonuçlar vermesi açısından oldukça önemlidir. Bu bağlamda GEM (Global Earthquake Model) Vakfı deprem riski hesabının tüm ülkelerde en gerçekçi şekilde yapılması ve yapı stoku bilgisinin derlenmesi üzerine önemli çalışmalar yapmaktadır [4].

Türkiye, yirminci yüzyılın ikinci yarısından sonra hızlanan nüfus artışı ve büyük şehirlere göç nedeniyle plansız kentleşmeye maruz kalmıştır. Kentlerde yoğunlaşan nüfusun acil ve nispeten düşük maliyetli barınma ihtiyacı hem yerleşim

alanlarının deprem tehlikesi yüksek bölgelere kaymasına hem de deprem güvenliği zayıf yapı stokunun büyümesine sebep olmuştur. Her ne kadar yeni deprem yönetmelikleri ve müteahhitlik hizmetlerinin kalite kontrolü Türk yapı stokunun zaman içerisinde iyileşmesine imkân veriyorsa da yumuşak kat, kısa kolon, kuvvetli giriş zayıf kolon gibi sistem yetersizlikleri ve tasarım kusurları barındıran binalar yapı stokumuzun önemli bir oranı teşkil etmeye devam etmektedir. Hem yeni binaların hem de deprem güvenliği zayıf nispeten eski binaların karakteristik özelliklerinin bilinmesi ülkemizin deprem risk ve kayıp hesaplarının doğru yapılabilmesi için büyük önem taşımaktadır.

Türk yapı stokunun karakteristik özelliklerinin bütüncül bir şekilde ele alındığı çalışmalar literatürde nispeten azdır. Mevcut çalışmalar genellikle belirli bir bölgedeki sınırlı sayıda binayı dikkate almakta (örn [5-6]) ve çoğunlukla Marmara Bölgesi'nin ya da İstanbul'un yapı stoku üzerine yoğunlaşmaktadır (örn. [7-9]). Örneğin [7] ve [8] çalışmalarında, başta İstanbul'da olmak üzere kuzey Marmara'da bulunan betonarme binaların karakteristik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmalarda, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından sunulan 2000 yılı Bina Sayımı [10] verileri kullanılmış, dikkate alınan bölgedeki bina stokunun taşıyıcı sistem tipi, kat sayısı, yapım yılı gibi genel özellikleri ortaya konmuştur. Bununla beraber, taşıyıcı sistem tipi, deprem şartnamesine uygunluk ve döşeme tipi özelliklerine göre oluşturulan örnek bina kümeleri daha detaylı bir incelemeye tabi tutulmuş ve giriş yüksekliği, kat alanı, kat yüksekliği, beton kalitesi, yapısal duvar kalınlığı vb. parametreler incelenmiştir. Benzer bir çalışma [11] tarafından İstanbul'un Zeytinburnu, Küçükçekmece ve Bakırköy ilçeleri ile Düzce iline ait bina envanterleri kullanılarak yapılmış; binalar, kat sayısı, kat yüksekliği, sürekli çerçeve sayısı, kolonlar arası açıklık, kolon boyutu ve kolon kuvvetli yönü – bina kuvvetli yönü ilişkisi açısından incelenmiştir. Ayrıca, [11] Türkiye'de sıklıkla karşılaşılan bir durum olan kolonların kesit alanının üst katlarda azaltılması açısından da bir değerlendirme sunmuştur. Bu bağlamda, [11] tarafından yapılan çalışma, deprem kayıp tahminlerinde kullanılacak

modellerin oluşturulması için önemli bir bilgi sunmakla birlikte kullanılan bina envanterinin spesifik bir bölgeye ait olması açısından Türk yapı stokunun tümünü temsil etmemektedir.

Türk yapı stokunun tamamını dikkate alan ve binaların özelliklerini il bazında ortaya koyan kapsamlı çalışmalara ihtiyaç vardır. Ayrıca mevcut çalışmalar çoğunlukla eski bina envanterlerine dayalı oldukları için özellikle 2000 sonrası üretilen nitelik ve nicelik açısından farklı yeni yapı stoku da dikkate alınmalıdır. Türkiye ölçeğinde bina özelliklerinin çıkartılması şüphesiz çok sayıda binanın incelenmesi ile mümkün olmakla beraber, zaman ve iş gücü olarak oldukça külfetlidir. Bu açıdan bakıldığında güncel veri kaynaklarının derlenmesi ve uyumlulaştırılması Türkiye'deki yapı stoku hakkında il bazında kapsamlı bilginin elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Bu verilerinin işlenmesi ile de Türkiye'deki binaları temsil eden analitik modellerin oluşturulması veya deprem kayıp hesaplarında kullanılacak bina envanterinin elde edilmesi mümkün olabilecektir.

Türk yapı stokunun tamamı hakkında bilgi sunan en önemli kaynak, TÜİK tarafından yayımlanan bina verileridir. Türkiye'deki bina tipi yapılar 2000 yılına kadar belirli aralıklarla TÜİK tarafından sayılmış ve binalar birtakım özelliklerine göre sınıflandırılmıştır. TÜİK tarafından en son 2000 yılında bina sayımı yapılmış, sonrasında bu kapsamda bir bina sayım istatistiği yayımlanmamıştır. Bir başka ifade ile son bina sayım istatistikleri güncelliğini yitirmiştir. TÜİK tarafından sağlanan bir diğer veri kaynağı ise 1992 yılından itibaren yapı izni almış tüm binalara ait bilgilerin derlendiği Yapı İzin İstatistikleridir. TÜİK, hem 2000 Bina Sayımı verilerini hem de Yapı İzin İstatistiklerini tüm Türkiye için farklı kaynaklarda sunmakta, ancak bu verilerin çözünürlüğü kaynaktan kaynağa ve yıldan yıla değişiklik göstermektedir. Bu çalışmanın temel amacı TÜİK tarafından sunulan 2000 Bina Sayımı ile Yapı İzin İstatistiklerini karşılaştırarak, Türk yapı stokunun özelliklerini ve bunların zamana bağlı değişimini ortaya koymaktır. Elde edilen veriler, Türk yapı stokunun temsili modellerinin daha gerçekçi bir



şekilde oluşturulmasında ve kayıp hesaplarında kullanılacak bina envanterinin elde edilmesinde rahatlıkla kullanılabilir.

## **2. YÖNTEM**

### **2.1. TÜİK Bina Stoku Veri Tabanları**

#### **2.1.1. 2000 Bina Sayımı**

2000 Bina Sayımı, 1984 yılında yine TÜİK tarafından yapılan bina sayımından 16 yıl sonra gerçekleştirilmiş ve Türkiye genelinde toplam 7.838.675 binada 16.235.830 daire (bina başına düşen daire sayısı yaklaşık 2,4) sayılmıştır. 2000 Bina Sayımında incelenen başlıca parametreler, binanın bitiş yılı, bina kullanım amacı, binanın sahibi, taşıyıcı sistem tipi, dolgu malzemesi türü, bina alanı ve toplam kat sayısı olarak sıralanabilir.

#### **2.1.2. TÜİK Yapı İzin İstatistikleri**

“Yapı Kullanma İzin Belgesi” formunun yapı ruhsatı sahipleri tarafından düzenlenmesi 2001 yılından itibaren zorunlu hale getirilmiştir. Düzenlenen Yapı İzin İstatistikleri TÜİK tarafından aylık olarak derlenmekte ve yıllık olarak kullanıcıların yararına sunulmaktadır [12]. Bina dışı inşaat türleri ve ruhsatsız yapılar TÜİK Yapı İzin İstatistikleri kapsamı dışında tutulmuştur. TÜİK verilerine göre 2001 ve 2015 yılları arasında geçen sürede yapı kullanma izin belgesi almış 1.221.607 adet ruhsatlı binada 6.194.426 daire bulunmaktadır 2001-2015 yılları arasında yapı kullanım izni almış binalarda bina başına düşen daire sayısına bakılacak olunursa, Türkiye ortalamasının 5,1 olduğu görülmektedir. 2000 Bina Sayımı verileri ile karşılaştırıldığında bina stokumuzdaki nitel ve nicel değişimin hızla devam ettiği sonucuna varılabilir.

#### **2.1.3. Çalışmada Dikkate Alınan Bina Özellikleri ve İnceleme Yöntemleri**

Çalışmada ele alınan veri tabanları kullanılarak, bina kayıp modellerinin elde edilmesinde, deprem risklerinin belirlenmesinde ve Türk yapı stoku için

temsili modellerin oluşturulmasında önem arz eden bina parametreleri derlenmiştir. Bu çalışmada derlenen bina parametreleri bina kullanım amacı, taşıyıcı sistem, bina dolgu malzemesi ve barındırdığı nüfus oranıdır.

Deprem kayıp çalışmalarında binaların kullanım amacı ve deprem dayanımı düşük binalarda yaşayan nüfus oranı sosyal hasargörebilirliğin hesaba katılabilmesi açısından önemlidir. Bu bağlamda binaların kullanım amacı bilgisi çalışmada sunulan istatistiklere dahil edilmiştir. Binalar ikamet amaçlı (İA) ve ikamet amaçlı olmayan (İO) şeklinde gruplanmıştır.

2000 sonrasında üretilen yapı stokunun, 1997 tarihli “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik” [13] ve 2000 tarihli “Yapı Denetimi Hakkında Kanun” [14] sebebiyle 2000 öncesi yapı stokundan büyük farklılıklar gösterdiği ortadadır. Bu nedenle, 2000 yılı öncesinde üretilen binaların deprem davranışına etki eden özelliklerinin 2000 sonrası üretilenler ile karşılaştırılması, mevcut yapı stokunun deprem riski açısından önemlidir.

Yapısal hasargörebilirliği ve deprem kayıp hesaplarını etkileyen en önemli parametrelerin başında taşıyıcı sistem tipi gelmektedir. Deprem riski ve kayıp hesaplarının gerçekçi bir biçimde ortaya konması, yapı stokundaki binalara ait taşıyıcı sistem bilgisinin elde edilmesi ise mümkündür. Bu bağlamda çalışmada dikkate alınan bina özelliklerinden biri olan taşıyıcı sistem büyük önem arz etmektedir.

Bina dolgu malzemesi, yapı istatistiklerinde dikkate alınan diğer parametrelere nazaran çoğunlukla ikincil öneme sahip bir parametre olarak görülmektedir. Taşıyıcı sistemi çerçeve (TÜİK verilerinde iskelet) olan binalarda dolgu duvar malzemesinin yük taşıma görevi yoktur. Ancak dolgu duvarların ve malzeme tipinin yapıların sismik davranışına etkileri olduğu, özellikle yüklerin sadece çerçeveler ile taşındığı binalarda katlar arası ötelenmeyi değiştirdikleri bilinmektedir [8, 15-17]. Buna ek olarak Türkiye’deki yığma yapılar ile ilgili çalışmalar (örn. [18]), hasargörebilirliğin yük taşıyan

duvarların malzemesi ile kuvvetli ilişkisini ortaya koymaktadır. Tüm bunlar dikkate alındığında dolgu malzemesi tipinin Türkiye'deki yapı stokunun büyük kısmını oluşturan betonarme çerçeveli ve yığma yapıların hasargörebilirliğinde kritik öneme sahip olduğu söylenebilir.

Türkiye bina stokunun genel özellikleri, inşaat teknolojisindeki gelişmeler, değişen sosyal ihtiyaçlar, yeni bina şartnameleri ve deprem gibi büyük doğal afetler ile birlikte zaman içinde değişimler göstermiştir. Ayrıca, yapı stoku son yıllarda nicel ve nitel açıdan değişim gerçekleştirmiştir. Bu açıdan bakıldığında yapı stokumuzun temel özelliklerinin zamana bağlı olarak değişiminin incelenmesi Türkiye ile ilgili yapılacak deprem kaybı ve risk yönetimi çalışmalarının gerçekçi bir şekilde yürütülmesine büyük katkı sağlayacaktır. 2000 Bina Sayımına göre binalara ait veriler bitiş tarihlerine göre onar yıllık zaman dilimlerinde gruplanmıştır. Yapı

kullanım izni verileri ise yıl bazında sunulmaktadır. Bu bağlamda, dikkate alınan parametrelerin zaman içerisindeki değişimini gözleyebilmek adına Yapı İzin İstatistikleri 2001-2009 ve 2010-2015 yılları için iki ayrı zaman diliminde gruplandırılarak ilgili parametrelere ait istatistikler dönemsel olarak incelenmiştir.

#### 2.1.4. 2000 Yılı Bina Sayımı ve 2001-2015 Yılları Yapı İzin İstatistiklerinin Uyumlu Hale Getirilmesi

2000 Bina Sayımı ve Yapı İzin İstatistikleri yapıların deprem risk ve kayıp hesaplarını etkileyen bina kullanım amacı, taşıyıcı sistem ve dolgu malzemesi değişkenlerini sunmaktadır. Bu değişkenlere ait alt sınıflar ise 2000 Bina Sayımı ve Yapı İzin İstatistiklerinde bazı farklılıklar göstermektedir. Çizelge 1, her iki veri tabanında kullanılan değişkenleri, bunların açıklamalarını ve alt sınıflarını sunmaktadır.

**Çizelge 1.** 2000 Bina Sayımı ve 2001-2015 Yapı İzin İstatistiklerinde dikkate alınan değişkenler ve değişken tipleri

Değişken Tipleri			
Değişken İsmi	Açıklama	2000 Bina Sayımı	Yapı İzin İstatistikleri (2001-2015)
Kullanım Amacı	Binanın ne amaçla kullanıldığı ifade etmektedir	Konut, Çoğunlukla Konut, Çoğunlukla İşyeri, Diğer	İkamet amaçlı ve ikamet amaçlı olmayan
Taşıyıcı Sistem	Yapının ağırlığını taşıyan inşaat tarzını ifade etmektedir	İskelet, Yığma, Tünel Kalıp, Önüretimli (Prefabrik), Bilinmeyen	İskelet (Çelik, Ahşap, Betonarme), Yığma, Kompozit, Önüretimli (Prefabrik)
Dolgu Malzemesi	Duvarlar için kullanılan dolgu malzemesidir	Çelik levha, beton blok, briket, tuğla, ahşap, taş, kerpiç	Beton blok, briket, tuğla, ahşap, taş, kerpiç, gaz beton, hafif panel, diğer

TÜİK verilerini kullanarak Türk yapı stokunun yıllar içindeki değişimini ortaya koyabilmek, deprem kayıp ve risk hesaplarında kullanılacak tek bir bina veri tabanı hazırlayabilmek öncelikle farklı yaklaşım, tanım ve yöntemler ile toplanmış verileri uyumlu hale getirmeyi gerektirmektedir. Çizelge 1'de görüldüğü üzere 2000 Bina Sayımı istatistiklerinde, binaların kullanım amacı konut, çoğunlukla konut ve çoğunlukla iş yeri olmak üzere 3 ana sınıf altında değerlendirilmiş ve bunun dışındakiler diğer kategorisinde sayılmıştır. Yapı İzin İstatistiklerinde ise binalar, kullanım

amaçlarına göre ikamet amaçlı ve ikamet amaçlı olmayan bina ana başlıkları altında toplanmıştır. Bu çalışmadaki karşılaştırmalarda, kullanım amacı istatistikleri ikamet amaçlı ve ikamet amaçlı olmayan binalar olarak iki kategoride sunulmaktadır. Bu nedenle, ikamet amaçlı bina istatistikleri için 2000 Bina Sayımındaki konut ve çoğunlukla konut olarak kullanılan binalar; ikamet amaçlı olmayan bina istatistiklerinde ise çoğunlukla işyeri ve kullanım amacı diğer olarak belirtilen binalar bir arada değerlendirilmiştir.

2000 Bina Sayımında taşıyıcı sistem tipi olarak yığma, iskelet, prefabrik ve tünel kalıp sistem tipleri sayılmıştır. TÜİK iskelet terimi ile çelik, betonarme veya ahşap taşıyıcı elemanların çerçeveler meydana getirdiği ve taşıyıcı olmayan duvarların bu çerçevelerin arasına yerleştirildiği binaları ifade etmektedir [10]. Çerçeve terimi çok daha yaygındır ancak TÜİK ile uyumu korumak adına bu çalışmada iskelet terimi kullanılmıştır. 2001-2015 yılları arası TÜİK Yapı İzin İstatistiklerinde, iskelet taşıyıcı sistem tipi çelik, ahşap ve betonarme olarak sınıflandırılmış, taşıyıcı sistem tipi çerçeveli betonarme sistem, çerçeveli-perdeli betonarme sistem ve perdeli betonarme sistem (tünel kalıp) olan yapılar betonarme iskelet adı altında toplanmıştır. Yapı İzin İstatistiklerinde tünel kalıp ayrı bir taşıyıcı sistem olarak ele alınmamıştır. Bu yüzden 2000 Bina Sayımı verilerindeki tünel kalıp taşıyıcı sistem tipi bu çalışmada sunulacak karşılaştırmalarda iskelet taşıyıcı sistem başlığı altında dikkate alınmış ve taşıyıcı sistem karşılaştırmaları her iki veri tabanında ortak olan yığma, iskelet, prefabrik ve diğer kategorileri için yapılmıştır. Dönemsel (2000 öncesi ve sonrası) karşılaştırmalarda ise daha ayrıntılı bilgi vermek adına her bir veri tabanı kendine özgü taşıyıcı sistem tipi bilgisine göre incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan veri tabanlarındaki bir başka farklılık ise dolgu malzemesi ile ilgilidir. 2000 Bina Sayımı verileri bina dolgu malzemesini taşıyıcı sistem tipine göre ayırmaktadır. 2000 Bina Sayımı istatistiklerinde bina dolgu malzemesi, iskelet ve yığma tipi taşıyıcı sistemler için ayrıntılı olarak verilmekte iken önüretimli ve tünel kalıp sistemler için herhangi bir ayrıntı verilmemiştir. 2001-2015 arası Yapı İzin İstatistiklerinde ise dolgu duvar bilgisi her bir iskelet sistem tipine (ahşap, çelik, betonarme) göre ayrı ayrı verilmektedir. Ayrıca 2001-2015 Yapı İzin İstatistiklerinde önüretimli ve kompozit taşıyıcı sistem tipleri için ayrıntılı dolgu malzemesi bilgisi mevcuttur. 2000 Bina Sayımı istatistiklerinde yer alan çelik dolgu malzemesi Yapı İzin İstatistiklerinde bulunmazken, 2000 Bina Sayımında yer almayan gaz beton ve hafif panel değişken tipleri Yapı İzin İstatistiklerinde mevcuttur. Bu sebeple çelik levha, gaz beton ve

hafif panel dolgu malzemeleri yapılacak karşılaştırmalarda diğer kategorisi altında değerlendirilmiştir.

Çalışmanın bir başka kabulü de 2000 yılı bina sayımı verilerinde yer alan binaların halen kullanımda olduğu kabulüdür. Bu kabul 2012 sonrası büyük kentlerde uygulanan kentsel yenileme çalışmaları sonucunda 2000 yılı öncesinde mevcut olan binaların bir kısmının yeni yeni binaların aldığı gerçeğiyle örtüşmemektedir. Ancak TÜİK, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve Nüfus ve Vatandaşlık İşleri Genel Müdürlüğü nezdinde yapılan çalışmalarda kentsel yenileme kapsamına giren bina sayısına ilişkin verilere erişim sağlanamamıştır. Bu çalışmada yıkılan veya kentsel yenileme kapsamına giren yapı sayısının mevcut bina stokunun nispeten küçük bir kısmına karşılık geldiği kabul edilmiş ve bu durumun çalışmada sunulan karşılaştırmalara büyük bir etkisinin olmayacağı varsayılmıştır. Bununla beraber, yıkılan veya kentsel yenileme kapsamına girmiş olan yapıların veri tabanında halen mevcut olması bu çalışmadan elde edilen çıktıların kullanılmasında güvenli tarafta kalınmasına sebep olacaktır. Bu bağlamda, bahsedilen yapı sayısının tüm yapı stokuna nazaran az olması ve veriler ile yapılacak hesapların güvenli tarafta sonuç vermesi çalışmanın kabul edilebilir bir eksik yönüdür.

### **3. ARAŞTIRMA BULGULARI**

#### **3.1. Bina Kullanım Amacına Göre Bina Sayısı**

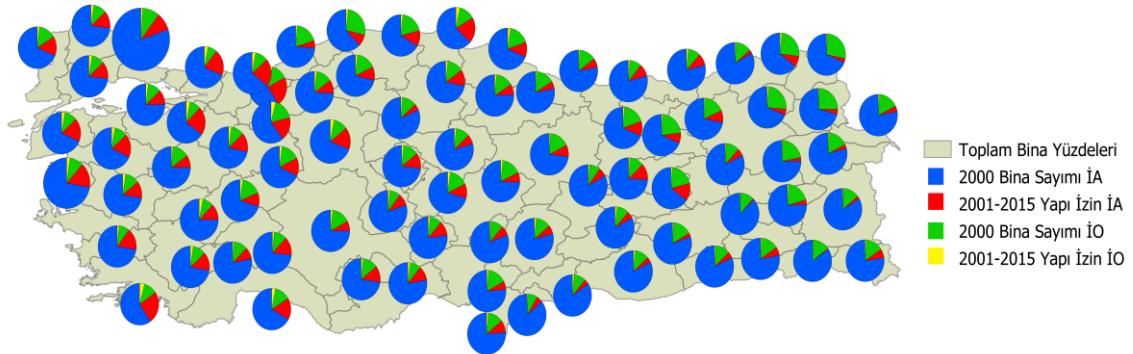
2000 Bina Sayımı ve 2001-2015 TÜİK Yapı İzin İstatistiklerinin birleştirilmesi ile elde edilen veri tabanı Türkiye genelinde toplam 9.060.282 adet bina içermektedir. Bu binalardan 6.735.813’ü 2000 yılı öncesinde ikamet amaçlı olarak inşa edilmiştir. Benzer şekilde 2001-2015 yılları arasında yapı kullanma izin belgesi alan ikamet amaçlı bina sayısı 1.046.563 adettir. İkamet amaçlı olmayan binalar dikkate alındığında ise 2000 yılı bina sayım istatistiklerine göre 1.102.862 bina bulunmaktadır. 2001-2015 yılları arasında yapı kullanma izin belgesi almış ikamet amaçlı olmayan bina sayısı ise 175.044’tür. Bu sayıları

yüzdelerle ifade etmek gerekirse, 2000 yılı öncesi inşa edilmiş ikamet amaçlı olan ve olmayan binalar birleştirilmiş yapı stokunun sırasıyla %74'ünü ve %12'sini oluştururken, 2001-2015 yılları arasında yapı kullanma izin belgesi almış ikamet amaçlı olan ve olmayan binalar birleştirilmiş stokun sırasıyla %12 ve %2'sini oluşturmaktadır. Bu sonuçlar 2000 yılı öncesinde ikamet amaçlı binaların ikamet amaçlı olmayan binalara oranının 2001-2015 yıllarında yapı kullanım izni almış binalarda da büyük oranda değişiklik göstermediğine işaret etmektedir. 2000 Bina Sayımı ve 2001-2015 Yapı İzin İstatistiklerine göre binaların kullanım amacına göre il bazında ayrı ayrı yüzdelik dağılımları Şekil 1'de gösterilmektedir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi 2000 yılı öncesi inşa edilmiş ikamet amaçlı binalar tüm illerde il yapı stokunun büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu

bağlamda, Türk yapı stokunu oluşturan binaların büyük bir kısmının eski deprem şartnamelerine göre tasarlanmış ikamet amaçlı binalar olduğu söylenebilir. Bu konunun daha detaylı incelemesi inşaat yılı verilerinin zaman dilimlerine göre incelenmesi ile mümkündür. Söz konusu inceleme makalenin sonraki kısımlarında verilmiştir.

Türk bina stokunda yer alan binaların kullanım amacına göre oranları zaman içinde büyük değişim göstermemiştir. Eldeki veriler ışığında, ikamet amaçlı binaların 2000 Bina Sayımına göre %85,9 olduğu, bu oranın 2001-2015 verilerine göre ise çok değişmediği ve %85,7 olduğu görülmektedir. Bu karşılaştırmalardan yola çıkarak Türk yapı stokunun bina kullanım amacına göre dağılımının zamandan bağımsız olduğu ve ikamet amaçlı olarak kullanılan binaların tüm yapı stokunun yaklaşık %86'lık kısmına karşılık geldiği sonucuna varılabilir.



**Şekil 1.** Birleştirilmiş bina veri tabanındaki binaların kullanım amacına göre il bazında oransal dağılımları. İA ikamet amaçlı binalar için, İO ise ikamet amaçlı olmayan binalar için kullanılan kısaltmadır

### 3.2. Taşıyıcı Sistem Tipi

Yapılan incelemeler, 2000 yılı bina sayımı verileri ve 2001-2015 yılları arası yapı kullanım izin istatistiklerinin taşıyıcı sistem konusunda büyük

farklılıklar gösterdiğine işaret etmektedir. Çizelge 2, 2000 Bina Sayımı istatistiklerinde yer alan binaların kullanım amacı ve taşıyıcı sistem tiplerine göre oranlarını göstermektedir.

**Çizelge 2.** 2000 Bina Sayımı kullanım amacı ve taşıyıcı sistem tiplerine göre bina yüzdeleri

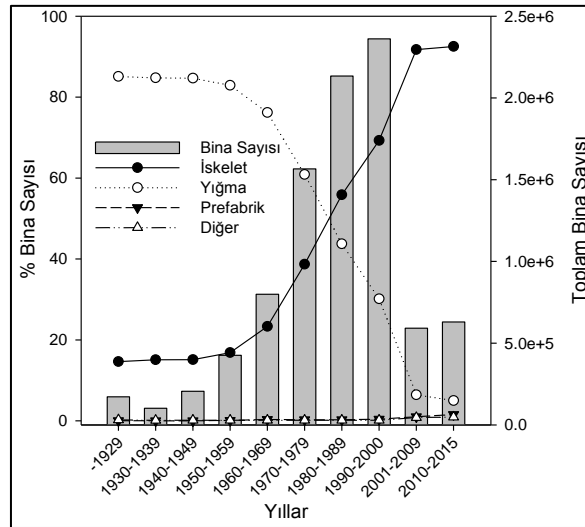
Kullanım amacı	Yığma	İskelet	Prefabrik	Tünel kalıp	Toplam
İkamet amaçlı	%44,43	%41,29	%0,17	%0,076	%85,97
İkamet amaçlı olmayan	%6,72	%7,18	%0,12	%0,005	%14,03



Şekil 2’de verilmekte olan dağılımlar her iki veri tabanında ortak olan yığma, iskelet, prefabrik ve diğer kategorileri altında yapılmıştır. Şekil 2’de görüldüğü üzere 2000 öncesinde yığma tipi taşıyıcı sistem en fazla görülen taşıyıcı sistem tipi iken, 2001-2015 yılları arası kullanım izni almış binalar ağırlıklı olarak iskelet tipi taşıyıcı sisteme sahiptir. 2000 yılı öncesinde, özellikle İç Anadolu, Ege, Doğu Karadeniz ve Doğu Anadolu bölgelerindeki illerde yığma tipi binalar çoğunlukta iken, 2000 sonrasında iskelet tipi taşıyıcı sistem birçok ilde büyük oranlarla hâkimdir. Ancak yine de Yozgat, Nevşehir, Kırşehir ve Niğde gibi illerde halen yığma tipi taşıyıcı sistemin fazlaca kullanıldığı görülmektedir. Şekil 2, ayrıca prefabrik ve diğer taşıyıcı sistem tipinin oldukça az oranda olduğuna işaret etmektedir.

Şekil 3, çalışmada dikkate alınan her bir zaman dilimindeki bina taşıyıcı sistem oranlarını

göstermektedir. Şekil 3’te ayrıca her bir zaman diliminde üretilen bina sayısındaki değişim de gösterilmiştir. Şekil 3’te görüldüğü gibi 1960 yılı öncesi yığma tipi taşıyıcı sistem kullanımı %80’in üzerinde iken 1960 sonrasında iskelet tipi taşıyıcı sistem kullanımı artmış ve 2000 yılında iskelet tipi taşıyıcı sistem oranı %70’e ulaşmıştır. İskelet tipi taşıyıcı sistemin 2001 yılından sonra %90’ının üzerinde bir orana ulaştığı görülmektedir. Eldeki bilgiler ışığında 1980 sonrası inşası tamamlanmış binaların büyük bir kısmının iskelet tipi taşıyıcı sisteme sahip olduğu rahatlıkla söylenebilir. Şekil 3’te verilmekte olan toplam bina sayısı, 2000 yılına kadar bina sayısının oldukça hızlı arttığını göstermektedir. Ancak 2001 yılı sonrasında inşa edilen bina sayısında büyük bir düşüş olduğu görülmüştür. 2001 sonrasında uygulanan zaman dilimleri önceki 10’ar yıllık dönemlere kıyasla daha kısa sürelerle tekabül etmektedir. Ancak yine de 2001 yılı sonrası yapılaşma hızında nispi bir düşüş olduğu gerçektir.

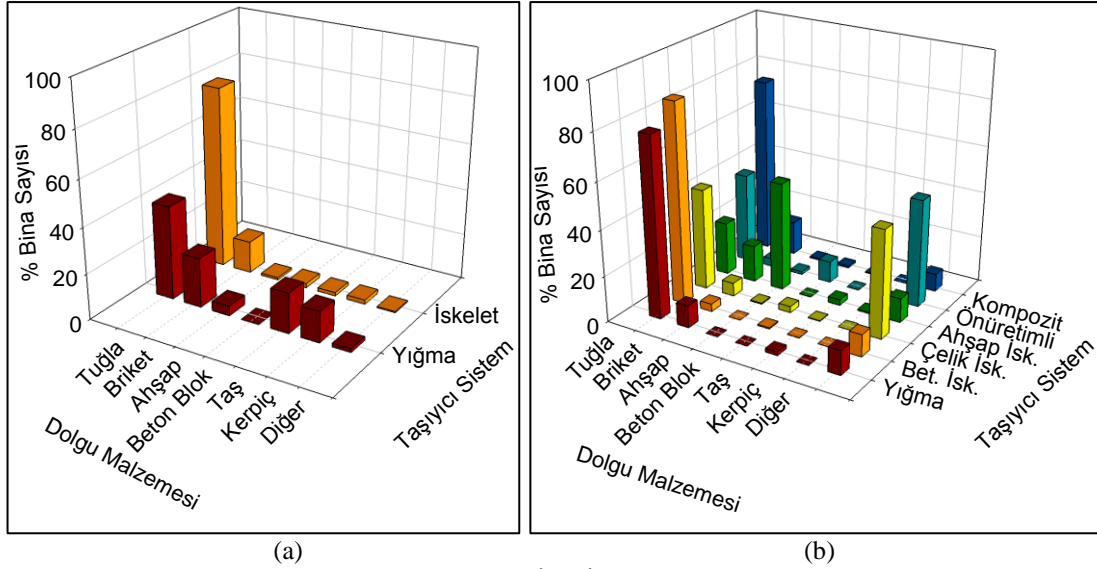


Şekil 3. Birleştirilmiş istatistiklere (2000 Bina Sayımı + 2001-2015 Yapı İzin İstatistikleri) göre taşıyıcı sistem tiplerinin zamana bağlı kullanım yüzdeleri ve üretilen bina sayısının zamana bağlı değişimi

### 3.3. Dolgu Malzemesi

Daha önce de bahsedildiği gibi, 2000 Bina Sayımı ve 2001-2015 Yapı İzin İstatistiklerinin karşılaştırılabilmesi amacı ile dolgu malzemesi her bir istatistikte mevcut taşıyıcı sistem tipi için ve

sadece ortak dolgu duvar tipleri için incelenmiş, ortak olmayan dolgu malzemesi tipleri “diğer” kategorisinde sunulmuştur. Şekil 4, 2000 yılı bina sayımı ve 2001-2015 Yapı İzin İstatistiklerine göre farklı taşıyıcı sistem tiplerinde kullanılan dolgu malzemesi yüzdelerini göstermektedir.



**Şekil 4.** 2000 Bina Sayımı (a) ve 2001-2015 Yapı İzin İstatistikleri (b) verilerine göre taşıyıcı sistem tipi ve dolgu malzemesine göre bina yüzdeleri

Şekil 4’de görüldüğü gibi 2000 yılı öncesi inşa edilen iskelet taşıyıcı sisteme sahip binalarda dolgu malzemesi olarak çoğunlukla (%79) tuğla kullanılmaktadır. İskelet tipi sistemlerde ikincil dolgu malzemesi olan briketin ise %14’lük bir kullanım oranı olduğu görülmektedir. 2001-2015 Yapı İzin İstatistiklerine göre ise nispeten yeni bina stokunun %85’inde dolgu malzemesi olarak tuğla kullanılmaktadır. Taşıyıcı sistem tipine göre değerlendirildiğinde betonarme iskelet binaların %86’sında tuğla kullanıldığı görülmektedir. Çelik iskelet tipindeki binalarda ise tuğla ve diğer kategorisinde dolgu malzemesi kullanımı sırasıyla %44 ve %47’lik değerlere sahiptir. Ahşap iskelet sistemine sahip binalarda ise dolgu malzemesi olarak çoğunlukla ahşabın (%51) tercih edildiği görülmektedir. 2001-2015 verileri ayrıca, kompozit taşıyıcı sisteme sahip binalarda öncelikli olarak tuğlanın sonrasında ise briketin yaygın olduğuna işaret etmektedir. Nispeten yeni yapı stokunda (2001-2015 yılları arası) yer alan önüretimli sistemlerde ise diğer kategorisinde yer alan hafif panelin en çok tercih edilen malzeme olduğu görülmektedir. Yığma tipi binalara bakıldığında 2000 yılı öncesinde duvar malzemesi olarak tuğla kullanımı oranının %40 olduğu görülmektedir. 2000 Bina Sayımı verileri, yığma

tipi sistemlerde duvar malzemesi olarak briket, taş ve kerpiç kullanım oranlarının sırasıyla %22, %18 ve %14 olduğuna işaret etmektedir. 2001-2015 yılları arasındaki veriler ise yığma tipi taşıyıcı sistemlerde duvar malzemesi olarak tuğla kullanımının oldukça yaygınlaştığını (%78) ortaya koymaktadır. Görüldüğü gibi dolgu malzemesi kullanımı zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Ayrıca eldeki veriler bu durumun bölgesel uygulama farklılıklarına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

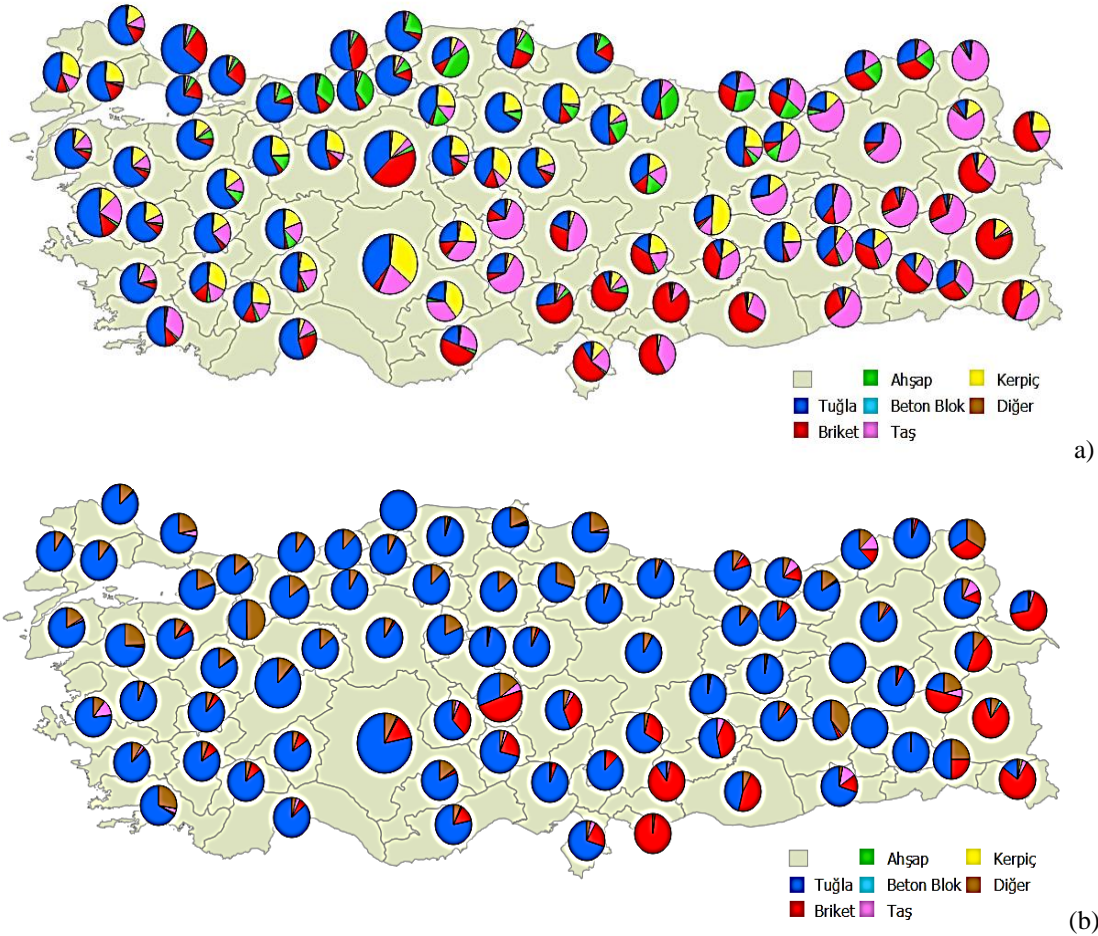
Şekil 5’te yığma tipi binalarda 2000 Bina Sayımı ve 2001-2015 Yapı İzin İstatistiklerine göre il bazında dolgu malzemesi kullanım oranları verilmektedir.

Şekil 5’te görüldüğü üzere, 2000 yılı ve öncesi inşa edilen yığma taşıyıcı sisteme sahip binalarda dolgu malzemesi il bazında büyük değişiklik göstermektedir. Özellikle Ege, Marmara, Batı ve Orta Karadeniz Bölgelerindeki illerde tuğla kullanımının büyük bir orana sahip olduğu görülmektedir. Bununla beraber, Doğu Akdeniz ve Güney Doğu Anadolu’da ve bazı doğu illerinde briket büyük bir orana sahiptir. İç Anadolu ve Doğu Anadolu’nun birçok ilinde ise dolgu



malzemesi olarak taş kullanımı yaygın görünmektedir. Şekil 5 ayrıca, ahşap dolgu malzemesinin Doğu ve Orta Karadeniz Bölgelerinde fazlaca kullanıldığına işaret etmektedir. Şekil 5'te görülen bölgesel uygulama farklılıkları, dolgu malzemesine erişimin ve geleneksel yapı karakteristiklerinin bölgeden

bölgeye değişiklik gösterdiğine işaret etmektedir. 2001-2015 arasında yapı izni almış yığma tipi binalarda ise bu farklılıkların çoğunlukla ortadan kalktığı ve tuğla kullanımının büyük oranda arttığı görülmektedir. Bazı Doğu ve Güneydoğu Anadolu illerinde ise briket hala tuğlaya göre daha fazla tercih edilmektedir.



Şekil 5. 2000 Bina Sayımına (a) ve 2001-2015 Yapı İzin İstatistiklerine (b) göre yığma taşıyıcı sisteme sahip binalarda il bazında dolgu malzemesi kullanım yüzdeleri

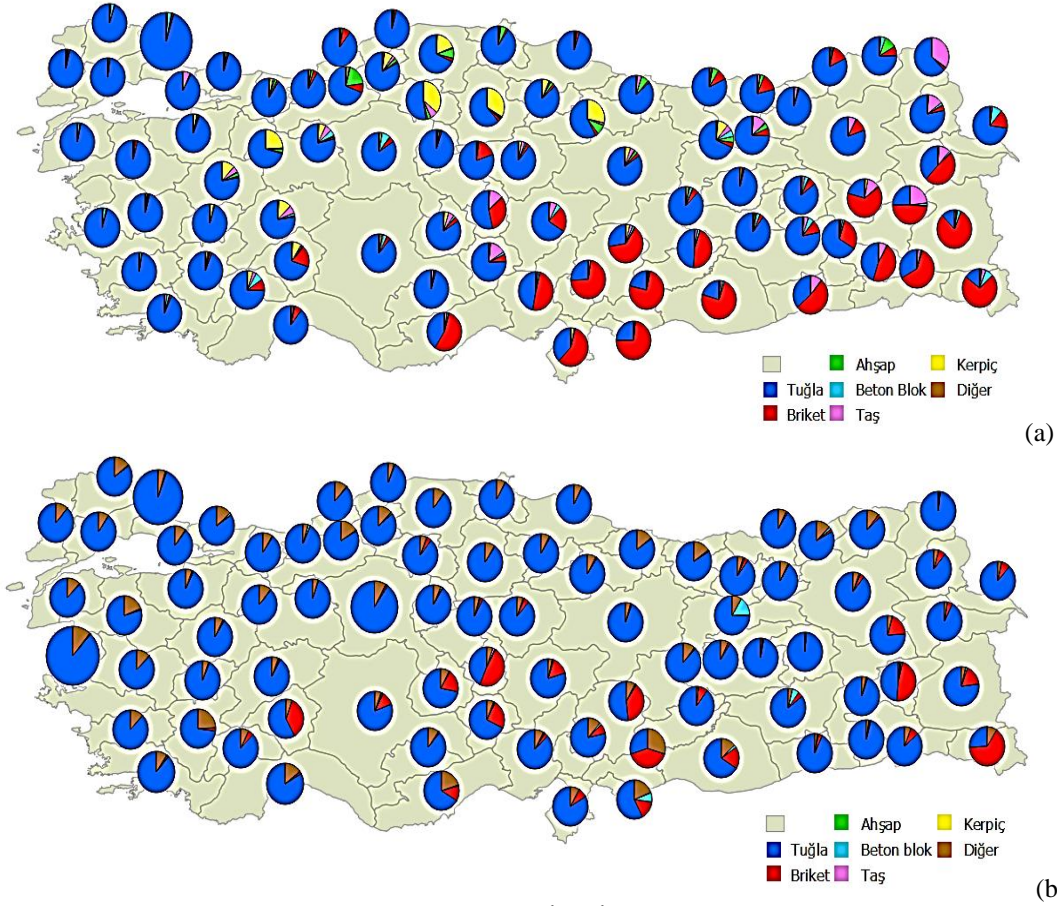
İskelet tipi taşıyıcı sistemlerde dolgu malzemesi tiplerine ait oranlar da mekânsal olarak incelenmiştir. Şekil 6, iskelet tipi binalarda dolgu malzemesini il bazında sunmaktadır.

Şekil 6, 2000 yılı öncesi ve 2001-2015 yılları arasında tuğla dolgu malzemesinin kullanımının

oldukça fazla olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, 2000 yılı öncesinde bazı illerde iskelet tipi taşıyıcı sistemde kerpiç kullanımının görüldüğü (hımış tarzı ahşap iskelet binalar), bu durum nispeten yeni binalarda (büyük çoğunlukla betonarme yapılar) terkedildiği görülmüştür. Bununla beraber, 2000 yılı öncesinde Güneydoğu

Anadolu, Doğu Akdeniz ve Doğu Anadolu bölgelerindeki bazı illerde briket tuğlaya göre daha fazla tercih edilirken 2001-2015 yılları arasında yapı kullanım izni alan binalarda ise tuğla kullanımının arttığı ancak halen bazı illerde

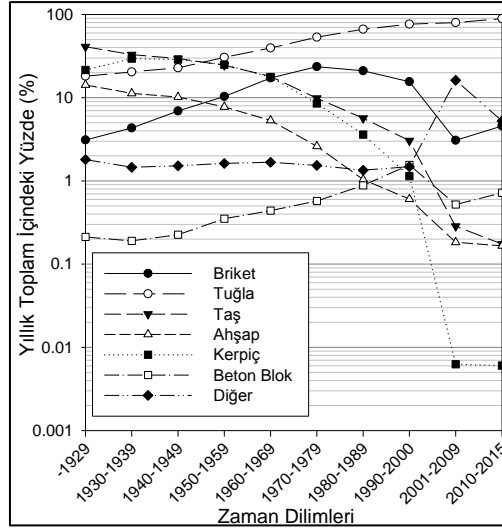
briketin tuğlaya göre daha çok kullanıldığı görülmektedir. Yapı stokumuzda kullanılan dolgu malzemelerinin taşıyıcı sistem tipine göre zamana bağlı değişimi Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 6. 2000 Bina Sayımına (a) ve 2001-2015 Yapı İzin İstatistiklerine (b) göre iskelet taşıyıcı sisteme sahip binalarda il bazında dolgu malzemesi kullanım yüzdeleri

Dolgu malzemesinin zamana bağlı kullanım oranlarına bakıldığında (Şekil 7) tuğla kullanımının hızlı bir artış gösterdiği ve 1990 sonrası inşa edilmiş binalarda bu oranın %80'in üzerine çıktığı görülmektedir. Ayrıca, briket kullanım oranları 1970'lere kadar bir artış göstermiş, ancak son yıllarda bu malzemenin kullanımında bir düşüş yaşanmış ve 2000 sonrası inşa edilen binalarda %5 seviyesinin altına gerilemiştir. Öte yandan, 1990 sonrası inşa edilen

binalarda ahşap ve kerpiç dolgu malzemesinin kullanımının çok az olduğu görülmektedir. Diğer kategorisinde bulunan dolgu malzemelerinin kullanım oranı son yıllarda artış göstermiştir. Bu artışın gerçek sebebi 2000 yılı sonrası gaz beton malzemesinin kullanımının artmasından kaynaklanmaktadır. Ancak yine de gaz beton kullanımı tuğlaya kıyasla oldukça düşük oranlardadır.



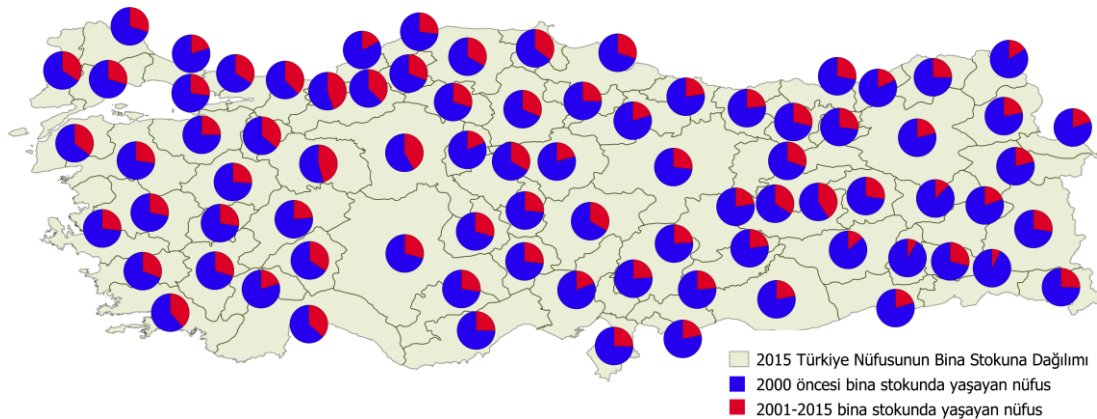
Şekil 7. Zamana bağlı dolgu malzemesi kullanım oranları

### 3.4. Türkiye Nüfusunun Bina Stokuna Göre Dağılımı

Çalışmada bina stoku ile nüfus arasındaki ilişki, 2015 yılındaki Türkiye nüfusunun 2000 öncesi üretilen ve nispeten yeni (2001-2015) bina stokuna dağılımı açısından da incelenmiştir. Bu bağlamda, 2015 yılı ülke nüfusunun il bazında 2000 öncesi ve 2001-2015 arasında üretilmiş toplam daire sayısı oranına göre homojen olarak dağıldığı kabul edilerek 2000 yılı öncesinde üretilen binalarda yaşayan insan sayısı ve 2001-2015 yılları arasında üretilen yapı stokunda yaşayan insan sayısı yüzdeleri elde edilmiştir. Şekil 8, 2015 yılı

Türkiye nüfusunun il bazında 2000 öncesi ve 2001-2015 arası üretilen bina stokuna dağılımını göstermektedir.

Şekil 8, 2015 yılı itibarıyla nüfusun büyük bir kısmının 2001 ve sonrasında üretilen binalara kıyasla deprem performansı açısından daha zayıf olduğu düşünülen 2000 öncesi üretilen binalarda yaşadığını göstermektedir. Türkiye geneli için yaklaşık %75 olan bu oranın birçok il için de geçerli olduğu ve çoğunlukla %60 ile %85 arasında değiştiği görülmüştür. Bu bağlamda, deprem riski altındaki ülke nüfusunun büyük bir orana sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 8. 2015 yılındaki nüfusun il bazında 2000 öncesi ve 2001-2015 arası üretilmiş bina stokuna dağılımı

#### **4. TARTIŞMA VE SONUÇ**

Deprem kaynaklı zararların azaltılması ve etkili afet yönetimi için mevcut yapıların deprem risklerinin gerçekçi bir şekilde hesaplanmasını gerekir. Bu bağlamda yapı stokunun deprem davranışını etkileyen özelliklerinin iyi bilinmesi, risk ve kayıp hesaplarının doğru yapılabilmesi için büyük önem taşır.

Türk yapı stoku son 50 yıl içerisinde göç ve hızlı artan nüfusun barınma ihtiyaçlarına cevap verebilmek için nicel ve nitel değişiklikler göstermiştir. 1970-2000 yılları arasında ucuz ve çok sayıda üretilen binaların yaşanan depremlerde gösterdiği performans deprem dayanımı zayıf konut stokumuzun varlığını net bir şekilde ortaya koymuştur. Yapı stokuna özellikle 2000 yılından sonra eklenen nispeten yeni binalar ise, güncel deprem şartnameleri, değişen sosyal ihtiyaçlar, gelişen inşaat teknikleri ve malzeme teknolojisindeki ilerlemelere paralel olarak yapı stokundaki mevcut binalardan farklılaşmış ve bunun neticesinde de Türk yapı stokunun genel karakteristiklerinin değişmesine yol açmıştır. Bu bağlamda Türk yapı stokunun genel özelliklerinin hem zaman dilimlerinde hem de bölgesel bazda değişiklik gösterdiği görülmektedir. Bu açıdan Türk bina stokunun zaman ve mekânsal açıdan irdelenmesi deprem risk hesaplarında büyük önem arz etmektedir.

Depremlerde gözlenen hasar ve literatürdeki çalışmalar, taşıyıcı sistem, malzeme ve yapım yılı gibi özelliklerin yapıların deprem davranışını etkileyen önemli parametreler olduğunu göstermektedir. Ülkemizdeki yapı stokunun çoğunluğunu oluşturan betonarme ve yığma yapı tipleri 2000 Bina Sayımı sonuçlarına göre birbirine yakın orandayken (bkz. Çizelge 2) 2001 ve sonrası üretilen yapılarda betonarme yapı tipi baskın duruma gelmiştir (bkz. Çizelge 3).

Özellikle 2000 öncesi üretilen yapı stokunun önemli bir kısmını oluşturan yığma binaların kırsal ve kentsel bölgelerde farklı özellikler gösterdiği literatürdeki çalışmalarda (örn. [18]) ortaya konulmuştur. Kırsaldaki yığma yapılarda çoğunlukla taş, briket ve kerpiç [18], kentlerdeki

yığma yapılarda ise tuğlanın daha fazla kullanıldığı [18,20] bilgisi, bu çalışmada elde edilen istatistikler ile uyumludur (bkz. Şekil 6). Özellikle kentlerdeki yığma yapılardan 1980 öncesi üretilenlerin malzeme ve harç dayanımlarının düşük olması, 1980-2000 arasında üretilmiş nispeten daha çok katlı olanların ise duvarlarındaki boşluk miktarlarının nispeten fazla olması zayıflık olarak belirtilmiştir [18, 19]. Bu bağlamda özellikle 2000 öncesi üretilen yapı stokunun önemli bir kısmını oluşturan yığma binaların orta büyüklükteki depremlerde dahi ağır hasar gördükleri hatta yıkıldıkları bilinmektedir [18].

Betonarme, uygulanış rahatlığı, nispeten ekonomik oluşu ve kolay malzeme temini açısından çağımızın yapı malzemesi durumundadır [20]. Ancak yetersiz mühendislik hizmeti, işçilik zayıflıkları, denetim eksikliği ve art arda gelen imar afları gibi hususlar özellikle 1980-2000 arası üretilmiş betonarme yapıları bina stokumuzun en hasargörebilir grubu haline getirmiştir [1, 2]. Nitekim ülkemizde 2000 öncesi üretilmiş betonarme yapıların deprem performansları kalkınmış ülkelere göre oldukça kötü durumdadır. Türkiye’deki depremlerde ağır hasar gören veya yıkılan betonarme yapıların oranı 1995 Kobe ve 1995 Northridge depremlerinde gözlenen oranların sırasıyla yaklaşık dört ve on iki katıdır [2].

Bu çalışmada, Türk yapı stokunun genel özelliklerinin ortaya konulması amaçlanmış, bu hedefe yönelik olarak da TÜİK tarafından en son 2000 yılında hazırlanan bina sayımı istatistikleri ve 2001-2015 yılları arasında yapı kullanım izni almış binaların verileri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veri tabanları, bina kullanım amacı, taşıyıcı sistem tipi ve dolgu malzemesi tipi ana başlıkları altında incelenmiştir. İncelenen parametreler, yapıların deprem riski ve kayıp hesaplarında oluşturulacak modellerde başlıca öneme sahip parametreler olarak değerlendirilmektedir. Çalışmada derlenen veri tabanları 2000 yılı öncesi bina stoku ve 2001-2015 yılları arasında üretilen bina stoku olarak karşılaştırılmış ve kapsam ve yöntem açısından farklı özellikteki veri tabanları uyumlaştırılarak birleştirilmiş şekilde incelenmiştir. Birleştirilen veri tabanları il bazında incelenerek bölgesel

farklılıklar ortaya konulmuştur. Ayrıca deprem performansının nispeten zayıf olduğu bilinen 2000 öncesi yapılarda ikamet eden nüfusun 2001-2015 arası üretilmiş nispeten daha güvenilir konutlarda ikamet eden nüfusa oranı karşılaştırılmıştır. Bununla beraber, Türk bina stokunun zamana bağlı değişimi de dikkate alınarak ele alınan bina parametreleri onar yıllık zaman dilimlerinde için sunulmuştur. Çalışmada elde edilen başlıca sonuçlar aşağıdaki maddelerde özetlenmektedir.

- Türk yapı stokunu oluşturan binaların yaklaşık %86'sı ikamet amaçlı kullanılırken, 2000 yılı öncesi inşa edilmiş ikamet amaçlı binalar yapı stokunun %75'ini oluşturmaktadır. Bu bağlamda yapı stokunu oluşturan her dört binadan üçünün 2000 yılı öncesi yapılmış ikamet amaçlı bina olduğu sonucuna varılabilir.
- Türkiye geneline bakıldığında Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde 2000 yılı sonrası bina yapım hızının diğer bölgelere göre daha yavaş seyrettiği söylenebilir.
- 1980 yılı öncesi inşa edilmiş 3.270.136 binanın 2.419.780 adedi (%74) yığma taşıyıcı sisteme sahiptir. 1980-2000 yılları arasında üretilmiş 4.495.748 binanın ise %37'si yığma (1.674.280 adet) taşıyıcı sisteme sahiptir. Bu sonuçlara dayanarak 2000 yılı öncesi bina stokunun yarı yarıya yığma ve iskelet taşıyıcı sistemden oluştuğu sonucuna varılmıştır. 2001-2015 arası üretilen bina stokuna (1.221.607 adet) bakıldığında ise iskelet taşıyıcı sistemin yaklaşık %90 oranında bir paya sahip olduğunu ve yığma taşıyıcı sistemin büyük oranda terk edildiği görülmektedir. Ülke genelinde ise yığma taşıyıcı sistemin özellikle İç Anadolu Bölgesi'nde halen önemli oranda olduğu söylenebilir.
- Türk yapı stokunu oluşturan binaların zamana bağlı dağılımına bakıldığında 1980-2000 yılları arasında bina üretim hızının arttığını ve bu zaman diliminde üretilen binaların tüm bina stokumuzun yaklaşık yarısını oluşturduğu sonucuna varılmıştır.
- Bina duvar dolgu malzemesinin kısmen taşıyıcı sistem tipine bağlı olduğu ve dolgu malzemesi olarak tuğlanın genel olarak yığma ve betonarme taşıyıcı sistemlerde büyük oranda kullanıldığı görülmüştür. 2000 yılı öncesi yığma yapılarda ise tuğlanın dışında briket, taş ve kerpiç kullanımının oldukça yaygın olduğu söylenebilir. Bu eğilimin genel olarak ülke geneline yayıldığı ancak özellikle Doğu Anadolu Bölgesi'nde dolgu malzemesi olarak taşın büyük oranda kullanıldığı, İç Anadolu Bölgesi'nde ise kerpiç kullanım oranlarının yüksek olduğu söylenebilir. 2001-2015 arası üretilen yığma binalarda ise tuğlanın ülke genelinde yaygın olduğu ancak özellikle Güney Doğu Anadolu ve Doğu Anadolu Bölgesi'nin doğu kısmında briket kullanımının devam ettiği görülmüştür. 2000 yılı öncesi iskelet taşıyıcı sistemde dolgu duvar malzemesi olarak genel olarak tuğlanın hâkim olduğu, Güney Doğu Anadolu ve Doğu Akdeniz kısımlarında briket, orta Karadeniz ve İç Anadolu Bölge'sinin kuzeyinde kerpicing kullanıldığı sonucuna varılmıştır. 2001-2015 yılları arasında üretilen iskelet taşıyıcı sisteme sahip yapılarda ise genel olarak tuğla hâkim iken bölgesel olarak briket kullanımının fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, özellikle duvar dolgu malzemesinin bölgesel özelliklerden etkilendiği sonucunu ortaya koymaktadır.
- Bu çalışmada elde edilen yapı stoku istatistikleri, 2000 yılı öncesinde üretilen binaların ve bu binalarda ikamet eden nüfus oranının yüksekliğini (sırasıyla yaklaşık %86 ve %74) açıkça ortaya koymaktadır.

## 5. KAYNAKLAR

1. Sucuoğlu, H., 2000. The 1999 Kocaeli and Düzce, Turkey Earthquakes. Mitigation of Seismic Risk-support to Recently Affected European Countries, 1, 1-10.
2. Erdik, M., 2001. Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes. Structural Control for Civil and Infrastructure Engineering, World Scientific.



3. Porter, K.A., 2003. An Overview of PEER’s Performance-Based Earthquake Engineering Methodology. Proceedings of Ninth International Conference on Applications of Statistics and Probability in Engineering, San Francisco, California.
4. Brzev, S.C., Scawthorn, A.W., Charleson, L., Allen, M., Greene, K., Jaiswal, Silva, V., 2013. GEM Building Taxonomy Version 2.0. GEM Technical Report 2013-02 V1.0.0, GEM Foundation, Pavia, Italy, 188.
5. Albayrak, U., Canbaz, M., Albayrak, G., 2015. A Rapid Seismic Risk Assessment Method for Existing Building Stock in Urban Areas, *Procedia Engineering*, 118, 1242-1249,
6. Kaplan, O., Güney, Y., Cengiz, A.E., Özçelikörs, Y., Topçu, A., 2015. Eskişehir İli Bina Envanterinin Yapısal Kusurları ve Düzensizlikler Bakımından İrdelenmesi, 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 14-16 Ekim 2015, İzmir, Türkiye.
7. Bal, I.E., Crowley, H., Pinho, R., Gülay, F.G., 2007. Structural Characteristics of Turkish RC Building Stock in Northern Marmara Region for Loss Assessment Applications. IUSS Press, Pavia.
8. Bal, I.E., Crowley, H., Pinho, R., Gülay, F.G., 2008. Detailed Assessment of Structural Characteristics of Turkish RC Building Stock for Loss Assessment Models. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 28(10-11), 914-932.
9. Konukcu, B.E., Karaman, H., Şahin, M., 2017. Determination of Building Age for Istanbul Buildings to be Used for the Earthquake Damage Analysis According to Structural Codes by Using Aerial and Satellite Images in GIS, *Nat. Hazards*, 85(3), 1811-1834.
10. Türkiye İstatistik Kurumu, 2000. Bina Sayımı, Ankara, Türkiye.
11. Eroğlu Azak T., Ay, B.Ö., Akkar, S., 2014. A Statistical Study on Geometrical Properties of Turkish Reinforced Concrete Building Stock. 2<sup>nd</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, August 24-29, İstanbul, Türkiye.
12. Türkiye İstatistik Kurumu, 2011. Yapı İzin İstatistikleri 2010, Ankara, Türkiye.
13. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, 1998. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
14. Yapı Denetimi Hakkında Kanun, 2001. 13.07.2001 Tarih ve 24461 Sayılı Resmî Gazete.
15. Akhoundi, F., Lourenço, P.B., Vasconcelos, G., 2016. Numerically Based Proposals for the Stiffness and Strength of Masonry Infills with Openings in Reinforced Concrete Frames. *Earthq Eng. Struct. D.*, 45(6), 869-891.
16. Erberik, M.A., 2008. Fragility-based Assessment of Typical Mid-rise and Low-rise RC Buildings in Turkey. *Eng. Struct.*, 30, 1360-1374.
17. Dolšek, M., Fajfar, P., 2001. Soft Storey Effects in Uniformly Infilled Reinforced Concrete Frames. *J. Earthq. Eng.*, 5, 1-12.
18. Erberik, M.A., 2008. Generation of Fragility Curves for Turkish Masonry Buildings Considering in-plane Failure Modes. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 37(3), 387-405.
19. Bal, I.E., Crowley, H., Pinho, R., 2008. Displacement-based Earthquake Loss Assessment for an Earthquake Scenario in Istanbul, *J. Earthq. Eng.*, 12(sup2), 12-22.
20. Tekin, İ., Akpınar, İ. 2014. Betonarmenin Anonimleşmesi Türkiye’de İkinci Dünya Savaşı Sonrası Yapılı Çevrenin İnşası. *Mimarlık*, 377, 70-74.

## Denim Kumaşlara Çevre Dostu Ön Terbiyesiz Boyama Metodunun Uygulanması

Serin MEZARCIÖZ<sup>\*1</sup> ID 0000-0002-0457-1500  
Serdal SIRLIBAŞ<sup>2</sup> ID 0000-0002-0926-6791

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana  
<sup>2</sup>Bossa T.A.Ş., Hacı Sabancı Organize Sanayi Bölgesi, Adana

Geliş tarihi: 24.06.2021

Kabul tarihi: 10.12.2021

Atıf şekli/ How to cite: MEZARCIÖZ, S., SIRLIBAŞ, S., (2021). Denim Kumaşlara Çevre Dostu Ön Terbiyesiz Boyama Metodunun Uygulanması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 1127-1136.

### Öz

Bu çalışmada, geleneksel sülfür boyamaya alternatif olarak çevreci ve sürdürülebilir bir boyama yöntemi geliştirilmiştir. Bu yeni boyama metodu ile konvansiyonel denim kumaş özellikleri daha az proses ve daha düşük su ve kimyasal kullanımı ile elde edilmeye çalışılmıştır. Hem konvansiyonel yöntem ile hem de yeni yöntem ile boyanan kumaşların renk, elastikiyet, kalıcı uzama ve seçilen bazı haslık değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre; spektrofotometrik sonuçlar elde edilen yeni rengin konvansiyonel boyama ile elde edilen renge göre daha açık olduğunu gösterse de kumaşlar görsel olarak birbirlerine oldukça yakın renklerdedir. Yeni metot kumaşların sürtünme haslığını iyileştirmiş, ancak yıkama ve ter haslığı değerlerinde önemli bir değişiklik yaratmamıştır. Uygulanan yeni metodun kumaşların elastikiyet ve kalıcı uzama değerleri üzerinde de önemli bir değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Denim, Sürdürülebilirlik, Sülfür boyama

### Application of Eco-friendly and Non-pretreatment Dyeing Method to Denim Fabrics

#### Abstract

In this study, an environmentally friendly and sustainable dyeing method has been developed as an alternative to traditional sulfur dyeing. With this new dyeing method, conventional denim fabric properties have been tried to be achieved with less processes and less water and chemical use. Color, elasticity, growth and some selected fastness values of fabrics dyed both with the conventional method and with the new method were examined comparatively. According to the results of the study; although the spectrophotometric results show that the new color obtained is lighter than the color obtained by conventional dyeing, the fabrics are visually very close to each other. The new method improved the rubbing fastness of the fabrics, but did not cause a significant change in the washing and perspiration fastness values. It was observed that the new method applied did not cause any significant changes on the elasticity and growth values of the fabrics.

**Keywords:** Denim, Sustainability, Sulfur dyeing

---

\* Sorumlu yazar (Corresponding author): Serin MEZARCIÖZ, [smavruz@cu.edu.tr](mailto:smavruz@cu.edu.tr)

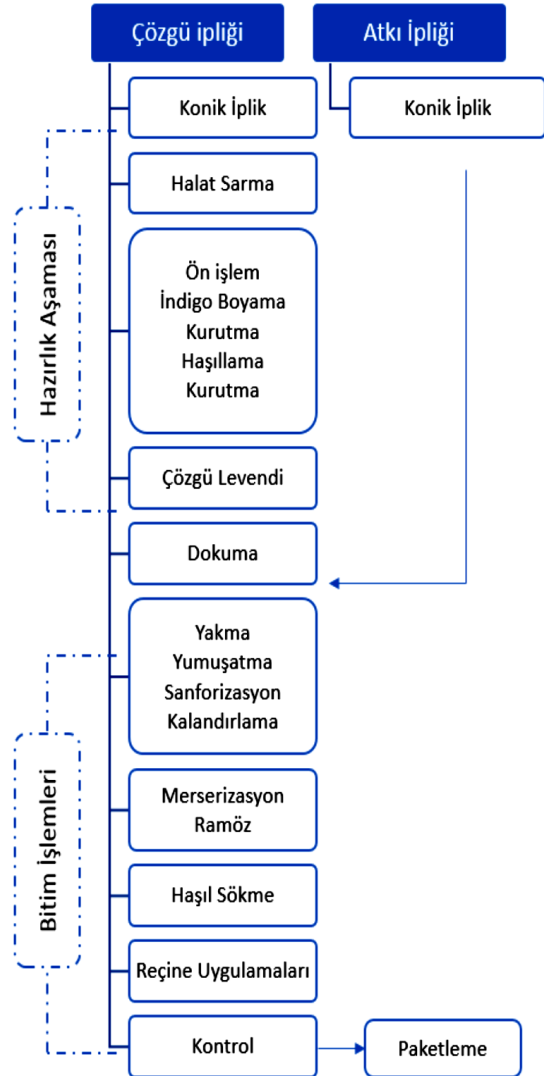


## 1. GİRİŞ

Denim kumaşlar dayanıklı ve zor aşınan kumaşlar olduğu için ilk denim giysiler, iş giysileri olarak üretilmiş ve kullanılmıştır. Zaman içerisinde yeni kesimler, otantik tasarımlar, boncuklu süslemeler ve işlemler ile şekillenen denim giysiler, her yerde ve toplumun her kesiminde giyilebilen giysiler haline gelmiştir. Geçen sürede denim kumaş ve denim kumaşlardan yapılan ürünler, insanların yaşam tarzlarının değişmesiyle birlikte değişmiş ve gelişmiştir. Denim kumaş en çok pamuk lifinden üretilen, bunun yanında son yıllarda içeriğinde poliester, elastan, keten ve viskon gibi lifler de kullanılan, klasik tiplerinde atkısı boyasız, çözgüsü indigo boyarmadde ile boyalı, çeşitli gramajlarda dokunabilen ve geniş desen yelpazesine sahip bir dokuma kumaş cinsidir [1]. Geçmişte ekonomiklik ve dayanıklılığı için tercih edilen ve günlük yaşantımızda hafta sonları kullanılabilen denim ürünler, artık günlük hayatın vazgeçilmez bir parçası olmuş, spor kıyafetlerin yanı sıra gece kıyafetlerinde, ayakkabı, terlik ve çanta üretiminde de kullanılmaya başlanmıştır [2].

Denim kumaş üretimi için uygulanan işlemler, iplik üretimi, halat sarma, indigo boyama, halat açma, haşılama, dokuma, terbiye işlemleri, kalite kontrol ve kumaş sevki gibi kademeleri içermektedir. Denim kumaş üretimi için örnek işlem akış şeması Şekil 1'de verilmiştir [3].

1980'li yıllardan günümüze denim kumaş üretimi; dokuma, boyama ve yıkama aşamalarında sürekli değişik metotlar denenerek çeşitlendirilmiştir. Klasik denim anlayışının dışına çıkılmasıyla, pamuk ile birlikte viskon, polyester, tensel, elastan gibi doğal, yapay ve rejenere lifler de kullanılmaya başlanmış ve her birinin denimde görüntü ve moda anlayışına yön verdikleri adımlar olmuştur. Denim kumaş indigo boyarmadde ile özdeşleşmiş olsa da son yıllarda çözgü ipliği sülfür boyalı olarak dokunmuş ürünlerin toplam denim ürün grubu içindeki payı artmaktadır. Sülfür boyarmaddenin düşük maliyette ve farklı renk paletine sahip olması, tüketicinin taleplerinin bir kısmını sülfür boyalı kumaştan yapılmış ürünlere yönlendirmiştir.

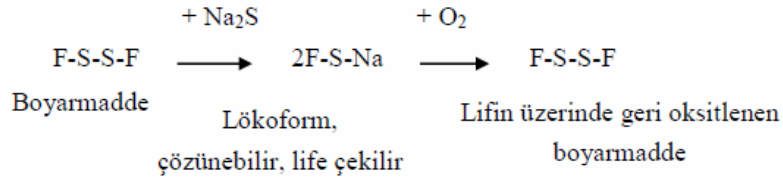


Şekil 1. Denim kumaş üretimi için işlem akışı [3]

Sülfür boyarmadde tanımı, bir yandan üretim yöntemine ancak aynı zamanda da aplikasyon yöntemine atıfta bulunur. Bunlar suda çözünmeyen çok moleküllü bağlardır ve kükürdün bazı organik bağlarla birleşmesinden oluşmuştur. Kükürt sodyumu ( $\text{Na}_2\text{S}$ – Sodyum sülfid) ile redüksiyon sonucunda boyarmadde suda çözünebilir hale getirilir. Suda çözünebilir şeklinin lif ile afinitesi yüksektir. Boyama sonrasında boyarmadde oksitlenme ile suda çözünmeyen haline geri dönüştürülür (Şekil 2) [4].

Selüloz elyafın, özellikle pamuğun renklendirilmesinde kullanılmaktadırlar. Elyaf fiksasyonu %60-70 civarındadır Renkleri parlak

olmamakla beraber yaş haslıkları çok yüksek ve fiyatları çok düşüktür [5].



Şekil 2. Sülfür boyarmadde ile boyama [4]

Selüloz ve karışımlarından oluşan çözgü ipliğinin kontinü olarak sülfür boyanması, indigo boyamada olduğu gibi daha çok halat boya ve slasher boyama makinelerinde yapılmaktadır. Bu makinelerin yer ihtiyacı ve yatırım maliyeti yüksektir ve her boya terbiye işletmesi bu makineler olmadığı için bu tarz üretim yapamamaktadır. Ayrıca sülfür boyama öncesi etkili bir ön terbiye işlemi de gerekmektedir. Yakma, haşıl sökme, kasar, yıkama, merserizasyon, kurutma, kostikleme, pişirme prosesleri ön terbiyede yapılan işlemler olarak sıralanabilir. İşletmelerin makine parkına, kumaşın daha sonra göreceği işleme, müşteri talebine, elyaf çeşidi ve karışım oranına göre ön terbiyede yapılacak işlemler değişkenlik

göstermektedir ancak en azından 2-3 işlem mutlaka yapılmaktadır.

Bu çalışmada, ön terbiye işlemleri yapılmadan çok kısa prosesle moda uygun spor tarzı, efekt alabilen kumaş üretilmesi sağlanmaya çalışılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

Çalışmada kullanılacak denim kumaşın çözgüsü %100 pamuklu Ne 13,5/1 olup, atkı ipliği 97/3 pamuk/elastan Ne 16/1'dir. İpliklere ve bu ipliklerden üretilen kumaşlara ait özellikler Çizelge 1 ve 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. İpliklere ait özellikler

	Rkm	Kopma uzaması (%)	Düzensizlik (%U)	Tüylülük	İnce yer (-50%)	Kalın yer (+50%)	Neps (+280%)
Ne 16/1	11,9	9,21	11,6	6,93	0	304	37
Ne 13,5/1	17,2	6,39	16,1	6,65	9	225	12

Çizelge 2. Üretilen kumaşa ait özellikler

Örgü tipi	Atkı iplik numarası (Ne)	Çözgü iplik numarası (Ne)	Atkı sıklığı (tel/cm)	Çözgü sıklığı (tel/cm)	Tarak numarası	Tarak eni (cm)	Gramaj (g/m <sup>2</sup> )
3/1 Z	13.5/1	16/1	20.5	30	135/2	215	330

### 2.2. Metot

İplik üretimleri gerçekleştirildikten sonra kumaş üretim ve terbiye işlemleri için iki ayrı proses

yürütülmüştür. İlk proseste pad batch boyama makinelerinde konvansiyonel kumaş boyaması uygulanmıştır. Kumaş sırasıyla haşılama, haşıl sökme, ağartma, yıkama ve kurutma gibi detaylı

ön terbiye işlemlerinden geçirilmiştir. İkinci işlemlerde ise azaltılmış bir işlem gerçekleştirilmiştir. Çözgü ipliği hazırlandıktan sonra sadece haşılama yapılmıştır ve sonraki dokuma ve diğer ard

işlemler standart yöntemler kullanılarak uygulanmıştır (ön terbiye işlemleri yapılmamıştır) (Çizelge 3).

**Çizelge 3.** Prosesler

<b>Metod</b>			
<b>Konvansiyonel metod</b>		<b>Yeni metod</b>	
<b>Proses</b>	<b>Detay</b>	<b>Proses</b>	<b>Detay</b>
Haşılama	Nişasta	Haşılama	Nişasta
Dokuma	Picanol dokuma tezgahı	Dokuma	Picanol dokuma tezgahı
Haşıl sökme	Sodyum hidroksit (10 g/l, flote oranı:1:100) 100 °C 30 dk 3 kez yıkama ardından 60 °C 2 saat kurutma.	-	-
Ağartma	Köpük kesici (0,5 g/l) Hidrojen peroksit (60 g/l) Sodyum hidroksit (45 g/l) İyon tutucu (7 g/l), ıslatıcı (3,5 g/l)	-	-
Yıkama	30 m/dk hız, 95 °C	-	-
Kurutma	Tamburlu kontakt kurutma, 110 °C tambur sıcaklığı	-	-
Yakma	Ön yüz yakma. 70 m/dk, 12 mbar	Yakma	Ön yüz yakma. 70 m/dk, 12 mbar
Boyama+yıkama	80 g black boyama + oksidasyon	Boyama+yıkama	80 g black boyama+oksidasyon
Kurutma	Boyama makinesinde tamburlu kontakt kurutma 35 hız. 110 °C tambur sıcaklığı	Kurutma	Boyama makinesinde tamburlu kontakt kurutma 35 hız. 110°C tambur sıcaklığı
Apren/fikse	140 °C 24 m/dk hız ile (apre reç: a.asit 3 g/l, yumuşatıcı: 10 g/l, ıslatıcı: 2 g/l)	Apren/fikse	140 °C 24 m/dk hız ile (apre reç: a.asit 3g/l, yumuşatıcı: 10 g/l, ıslatıcı: 2 g/l)
Sanfor	30 m/dk hız	Sanfor	30 m/dk hız

Proses tablosu incelendiğinde yeni metotta; haşıl sökme, ağartma, yıkama ve kurutma işlemlerinin yer almadığı görülmektedir. Bu yeni yöntem ile yenilikçi/sürdürülebilir prosesler ile konvansiyonel boyama ile elde edilen görüntüye ulaşılmaya çalışılmıştır. Böylece işlem daha hızlı, verimli, çevreci hale getirilmiş olacaktır. Çalışma kapsamında kumaşların renk, elastikiyet, kalıcı

uzama, yıkama haslığı, ter haslığı ve sürtünme haslığı değerleri incelenmiştir.

Kumaşlara uygulanan testler ve standartları Çizelge 4’de görülmektedir. Tüm numuneler 24 saat standart atmosfer koşullarında kondisyonlandıktan sonra aşağıdaki testler uygulanmıştır.

**Çizelge 4.** Kumaşlara uygulanan testler ve standartları [6-10]

Ölçülen özellikler	İlgili standart
Renk ölçümü	-
Yıkama haslığı	TS EN ISO 105 C06: 2001
Sürtünme haslığı	TS EN ISO 105-X12:2006
Ter haslığı	TS EN ISO 105 E04:2012
pH değeri	TS EN ISO 3071:2009
Yüzey özelliklerinin incelenmesi	-
Elastikiyet	ASTM D3107-07:2015.
Kalıcı uzama	ASTM D3107-07:2015.

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

#### 3.1. Renk Ölçümü

Yıkama işlemlerindeki gelişmeler ve kullanılan kimyasalların özellikleri arttıkça, denim

kumaşlarda değişik yıkama çeşitleri elde edilmiştir. Yıkama işlemi, dikilmiş denim giysisine, özel yıkama makinelerinde belirli reçete ve tekniklere göre yıkama yapılarak değişik renk ve tuşe kazandırılması işlemidir.

Denim kumaştan üretilen ürünler genel olarak endüstriyel yıkama yapılarak satışa sunulmaktadır. Bu çalışmada uygulanan yeni metodun kumaşın renk değerlerine etkisi incelenirken özellikle bazı endüstriyel yıkamalar sonrası bu değerlerin ölçülmesi ve karşılaştırılmasının daha uygun olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle hem konvansiyonel olarak boyanan kumaşa hem de yeni uygulanan boyama metodu sonucu elde edilen kumaşa endüstriyel yıkamalar yapılmıştır. Böylece yıkamalar sonucu ulaşılabilecek renk tonları da görülmüş, kıyaslamalı analizleri yapılmıştır. Endüstriyel yıkamalar kumaşlara paça formatında uygulanmış olup, reçetesi aşağıda verilmiştir (Çizelge 5).

**Çizelge 5.** Yıkama reçetesi

	Proses	Proses adımları			
		Süre (dk)	Sıcaklık (°C)	Kimyasal adı	Miktar
<b>Rins yıkama</b>	Yumuşatma	2	30	Noniyonik yumuşatıcı	3 ml/l
	Kurutma	45	80	Semi-mikro silikon emülsiyonu	3 ml/l
<b>Taş yıkama</b>	Taş yıkama	30	45	Nötr Selülaz- taş enzimi	3 ml/l
				Polimer bazlı dispergator	2 ml/l
	Yumuşatma	10	40	katyonik yumuşatıcı	3 ml/l
				Semi-mikro silikon emülsiyonu	3 ml/l
Kurutma	45	80			

Kumaşlar rins ve taş yıkama proseslerinden geçirildikten sonra renk değerleri ölçülmüştür. Çünkü yeni metodun özellikle kumaşın renk değerlerinde değişiklik yaratmaması istenmektedir.

Farklı yıkama reçeteleriyle yıkanmış konvansiyonel ve yeni metod numune kumaşlarının

CIELab (L\*, a\*, b\*, c\* ve h) değerleri ile  $\Delta E$  renk farklılığı değerleri ölçülmüş ve kıyaslanmıştır (Çizelge 6-7). Çizelge 7 için; referans olarak konvansiyonel metotla boyanmış kumaş renk değerleri esas alınmıştır. Numunelerin yıkama öncesi de renk analizleri yapılmıştır.

**Çizelge 6.** Ölçülen CIELab değerleri

Numune	Proses	Renk değerleri				
		L*	C	a*	b*	h
Konvansiyonel metot ile boyanan kumaş	Yıkamamış	16,81	1,44	1,23	0,74	31,06
	Rins yıkama	15,87	1,28	1,16	0,54	24,88
	Taş yıkama	15,79	0,92	0,71	-0,58	321,04
Yeni metot ile boyanan kumaş	Yıkamamış	18,31	1,12	1,02	-0,46	336,06
	Rins yıkama	17,61	1,15	0,83	-0,8	316,18
	Taş yıkama	22,05	2,16	0,18	-2,15	274,68

**Çizelge 7.** Yeni metot ile boyanan kumaşların renk farklılığı

	Renk farklılığı						Değerlendirme
	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta C^*$	$\Delta h^*$	$\Delta E$	
Yıkamamış	1,497	-0,206	-1,196	-0,316	1,172	1,93	KALIR (numune daha açık, daha yeşil, daha mavi, daha zayıf)
Rins yıkama	1,739	-0,334	-1,337	-0,132	1,372	2,22	KALIR (numune daha açık, daha yeşil, daha mavi, daha zayıf)
Taş yıkama	6,256	-0,537	-1,576	1,243	1,108	6,47	KALIR (numune daha açık, daha yeşil, daha mavi, daha kuvvetli)

Spektrofotometrik sonuçlar incelendiğinde elde edilen yeni rengin konvansiyonel boyama ile elde edilen renge göre daha açık olduğu tespit edilmiştir.

Yeni üründe ön işlem olarak haşıl sökme, ağartma, yıkama vb. işlemler bulunmamaktadır. Özellikle haşıl sökme işleminin yapılmamasından dolayı, boyama sırasında boyarmaddeler kumaş içerisine tam olarak nüfuz edememekte ve yüzeyde kalmaktadır. Standart kumaşa ise detaylı ön işlem yapıldığı için liflerin şişmesi ile kumaşın hidrofilitesi artmaktadır. Dolayısıyla boyarmadde daha fazla kumaş içerisine nüfuz etmektedir. Böylelikle konfeksiyon sonrası istenilen renk açıklığı daha kısa işlem süresi ile elde edilmiştir. Detaylı ön terbiye işlemi görmüş kumaşlarda istenilen denim efektinin alınması zordur.

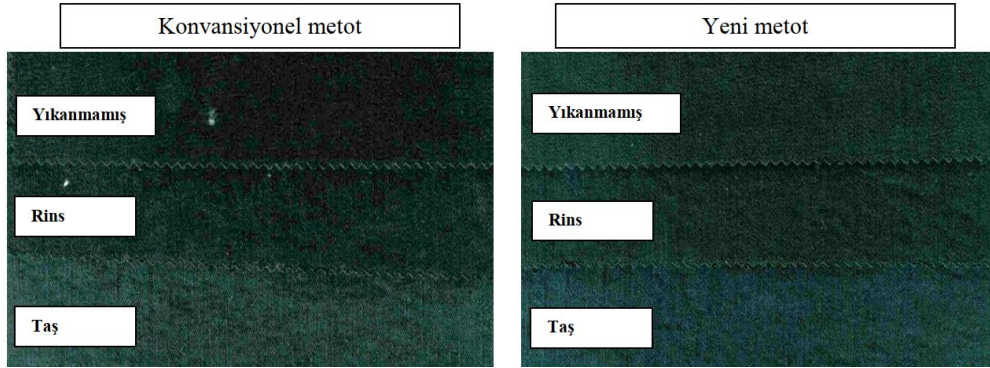
Rins yıkama, klasik bir denim yıkama prosesinde kurutma öncesi yapılan son işlem adıdır. Yumuşatma ile ürün üzerinde istenen tuşe efektinin verilmesi sağlanır. Kullanılan yumuşatıcı maddeler, kumaşın belirli bir yumuşaklık ve dökümlülüğe sahip olmasını sağlar [11]. Ürün üzerinde istenilen eskimiş veya yıpranma efektleri

en çok taş yıkama ile gerçekleşmektedir. Buradaki efektler, ürünlerin makineye ve kendi aralarındaki sürtünmelerinden oluşabileceği gibi, bunlar için yardımcı kimyasal olacak selüloz enzimleriyle de sağlanabilmektedir. Ayrıca işletmelerde mekanik sürtünme etkisini artırmak amacıyla ponza taşı da kullanılmaktadır [11,12]. Taş yıkama uygulamasının boyarmadde pigmentlerini uzaklaştırarak kumaşın rengini soldurduğu tespit edilmiştir. Çünkü taş yıkama uygulamalarında kumaş/iplik yıprandıkça kumaş üzerindeki boyarmaddeler akmaktadır. Yeni metot ile boyanan kumaşlarda boyarmadde kumaşa tam nüfuz etmediği için, solma daha fazla olmuştur.

Yıkamamış kumaşlarda renk farkı daha küçüktür. Aynı yıkamalara tabi tutulmuş standart kumaş ve yeni metot ile boyanan kumaşlarda konvansiyonel kumaş daha koyu kalmakta, üzerindeki sülfür boyayı daha geç atmaktadır. Yıkama yapıldıkça kumaş içerisindeki haşıl bir miktar uzaklaşıp renk açılmaktadır. Detaylı ön terbiye görmüş kumaş rengini koruma eğilimindeyken, yeni metot ile boyanan kumaşın rengi daha kolay açılmıştır.

Kumaşlara yıkama işlemleri uygulandıktan sonra standart boyanan ve yeni metot ile boyanan kumaşların renk değerleri birbirlerinden uzaklaşmıştır. Çizelge 6 ve 7 incelendiğinde en fazla renk değişiminin taş yıkama uygulamasında

olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 3'de verilen kumaş görüntülerine göre; yeni metot ile boyanan kumaşların renkleri konvansiyonel metot ile boyanan kumaşların rengine oldukça yakındır.



Şekil 3. Kumaş görüntüleri

### 3.2. Haslık Testleri

Denimin yaş sürtünme haslıklarının çok düşük olduğu bilinmektedir. Çizelge 8'e göre yeni metot, kumaşların kuru sürtünme haslığı değerini çok azda olsa iyileştirmiştir. Çünkü yeni metot ile kumaşa nüfuz eden toplam sülfür boyarmadde miktarı daha azdır.

Çizelge 8. Numunelerin sürtünme haslığı ve pH değerleri

Test adı	Konvansiyonel metot		Yeni metot	
	Kuru	Yaş	Kuru	Yaş
Sürtünmeye karşı renk haslığı	3/4	1/2	4	1/2
pH	4,2		5,4	

pH değeri yüksek olan kumaşlar, kolaylıkla cilde zarar vererek alerjik reaksiyonlara yol açabilmektedir. Üretim aşamalarında kullanılan her kimyasalın, bitmiş üründeki pH değerine etkisi bulunmaktadır. pH değeri, yıkama ve nötrleştirme basamaklarında kontrol altına alınabilmektedir [13]. Eko-Teks 100 standardına göre pH tayini ISO 3071 (Potasyum klorür çözeltisi) uyarınca tespit edilmektedir. Bu standart kapsamında pH değerinin alt ve üst limit değeri sırasıyla 4,0 ve 7,5 olarak kabul edilmiştir. Yeni yöntemle boyanan kumaşın pH değerinin konvansiyonel yöntemle boyanan kumaşa göre daha alkali olduğu tespit edilmiştir. Bu pH değeri, OEKO-TEX standartlarında belirtilen sınırlar içindedir.

Numunelerin diğer haslık değerleri Çizelge 9'da görülmektedir.

Çizelge 9. Diğer haslık değerleri

Test adı	Konvansiyonel metot							Yeni metot						
	Yün	Akrilik	PES	Nylon	Pamuk	Asetat	Renk solması	Yün	Akrilik	PES	Nylon	Pamuk	Asetat	Renk solması
Yıkama haslığı	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
Asidik ter haslığı	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
Bazik ter haslığı	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5

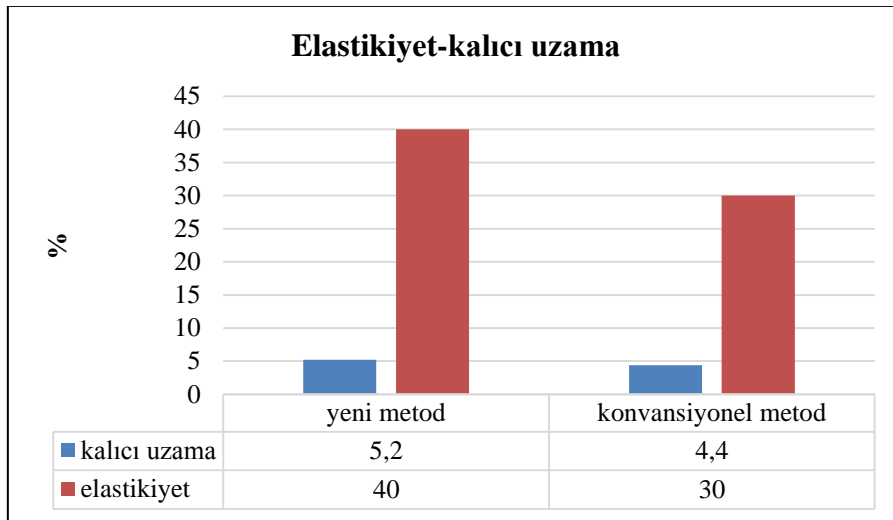
İncelenen yıkama ve ter haslığı değerleri için yeni metot ile boyanan kumaşlar ile konvansiyonel metot ile boyanan kumaşlar arasında refakat bezine akma ve numunenin solma değerleri açısından fark çıkmamıştır. Sonuç olarak; yeni metotta işlem sayısının az olmasının denim kumaşların kullanım esnasında karşılaştıkları yıkama haslığı, asidik ve bazik ter haslığı için olumsuz bir durum yaratmayacağı görülmüştür.

### 3.3. Elastikiyet ve Kalıcı Uzama Testi

Elastikiyet; belirli bir kuvvet altındaki kumaşın gösterdiği kalıcı olmayan uzama eğilimidir. Kalıcı uzama ise belirli kuvvet altında kalan kumaşın yapısında oluşan deformasyonlar sonucunda ilk

haline dönememesidir [14]. Numunelere uygulanan elastikiyet ve kalıcı uzama test sonuçları Şekil 4’de verilmiştir.

Test sonuçlarına göre; uygulanan yeni metodun kumaşların elastikiyet ve kalıcı uzama değerleri üzerinde önemli bir değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür. Bu değerler daha çok elastan özelliklerine bağlı olduğundan prosesler sonucunda elastanın herhangi bir zarar görmediği düşünülmektedir. Ayrıca elastan lifi sadece atkı ipliğinde kullanılmış olup, kullanılan haşıl maddesi de sadece çözgü ipliklerine uygulandığından, kumaşların elastikiyet ve kalıcı uzama değerlerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir.



Şekil 4. Elastikiyet ve kalıcı uzama test sonuçları

Çevre dostu bir proses önerilen bu çalışmada, konvansiyonel boyama ve önerilen yeni boyama proseslerinin sahip oldukları ortalama enerji ve su tüketimleri ve bunların çevre üzerindeki etkileri

Çizelge 10’da verilmiştir. Böylelikle somut veriler üzerinden de elde edilen kazanımlar görülebilmektedir.

Çizelge 10. Proseslerin enerji ve bazı çevresel etkileri

	Su (l/m)	Elektrik (kWh/m)	Doğal gaz (Sm <sup>3</sup> /m)	Küresel ısınma (GWP100a) (kg CO <sup>2</sup> eq)	Ozon tabakası incelmeleri (kg CFC-11 eq)	İnsan toksitesisi (kg 1,4-DB eq)	Asidifikasyon (kg SO <sub>2</sub> eq)	Ötrofikasyon (kg PO <sub>4</sub> --- eq)
Konvansiyonel metot	74,85	0,41	0,44	0,771407751	0,000000086	0,123296338	0,002202501	0,000949554
Yeni metot	30,9	0,27	0,25	0,461361803	0,000000050	0,075727547	0,001363031	0,000598619
Fark	43,95	0,14	0,19	0,310045948	0,000000037	0,047568791	0,000839470	0,000350935



Çizelge 10'a göre yeni metot ile işlem görmüş kumaşların prosesinde kullanılan su, enerji ve doğalgaz tüketimi çok düşüktür. Ayrıca azaltılmış proses kullanıldığında çevre üzerindeki olumsuz etki de önemli ölçüde azalmaktadır. Dolayısıyla çalışmamızda önerilen yeni boyama metodunun çevre dostu ve sürdürülebilir olduğu görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Çalışma sonuçlarına göre; çözümlü ipliği sadece haşlanmış, dokunmuş, yaş ön terbiye işlemi yapılmadan boyanıp mamül hale getirilen kumaş endüstriyel yıkama işlemlerine tabi tutulduktan sonra, detaylı ön terbiye görmüş ve sonrasında tekrar boyanmış kumaş görüntüsüne benzemektedir. Böylece halat boyama makineleri olmadan, su, enerji, zaman, işçilik ve kimyasal tasarrufu sağlanarak birçok boya terbiye işletmesinin kolaylıkla yapabileceği denim kumaş üretiminin gerçekleştirilebileceği görülmüştür.

Kumaşlara yıkama işlemleri uygulandıktan sonra konvansiyonel boyanan ve yeni metot ile boyanan kumaşların renk değerleri birbirlerinden uzaklaşmıştır. Uygulanan yeni metodun kumaşların elastikiyet ve kalıcı uzama değerleri üzerinde önemli bir değişikliğe sebep olmadığı tespit edilmiştir.

Yeni metot ile boyanmış kumaşların kuru sürtünme haslığı değerleri iyileşmiş, pH ve diğer haslık değerlerinde önemli değişiklikler olmamıştır.

Çevre kirliliğinde tekstil sektörünün oynadığı büyük rol, doğal hayatın korunabilmesi, kaynakların sürdürülebilir olması, çevre hukuku ile ilgili gelişmeler ve rakiplerin çoğalması işletmelere birçok sorumluluk yüklemiştir. Bunlardan biri ve en önemlisi daha az su, kimyasal, boya, enerji ve zaman kullanarak çevreye saygılı, amaca uygun ve ucuz ürün üretmektir. Bu amaçla çevre dostu bir proses önerilen bu çalışmada, konvansiyonel boyama ve önerilen yeni boyama proseslerinin sahip oldukları

çevresel yükler de incelendiğinde oldukça iyi kazanımlar elde edildiği söylenebilmektedir.

Bu yeni yöntem ile yenilikçi/sürdürülebilir prosesler elde edilmeye ve konvansiyonel boyama ile elde edilen görüntü ve fiziksel özelliklere ulaşılmaya çalışılmıştır.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK (TEYDEB) tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 3190159

#### 6. KAYNAKLAR

1. Seyrek Kurban, N., Babaarslan, O., 2019. Süper Streç Denim Kumaşların Özelliklerine Dair Literatür İncelenmesi, *Tekstil ve Mühendis*, 26(113), 104-115.
2. Bağır, İ.C., 2011. Denim Yıkamada Karşılaşılan Sorunlar ve Bunlara Yönelik Çözüm Önerileri. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği, Anabilim Dalı, İzmir, 293.
3. Üstütağ, S., 2018. Denim Kumaşlara Uygulanan Kaplama Proseslerinin Taguchi Metodu ile İncelenmesi. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 135.
4. Kiroğlu, M., 2018. Levent Boyama Kalitesinin İyileştirilmesi Yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 63.
5. Başer, İ., İnancı, Y., 1990. Boyarmadde Kimyası. Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Tekstil Eğitimi Bölümü Yayınları, İstanbul, 216.
6. TS EN ISO 105 C06: 2001. Tekstil-Renk Haslığı Deneyleri-Bölüm C06: Eysel ve Ticarî Yıkamaya Karşı Renk Haslığı.
7. TS EN ISO 105-X12, 2016. Tekstil-Renk Haslığı Deneyleri-Bölüm X12: Sürtmeye Karşı Renk Haslığı Tayini.
8. TS EN ISO 105-E04, 2006. Tekstil-Renk Haslığı Deneyleri-Bölüm e04: Terlemeye Karşı Renk Haslığı Tayini.
9. TS EN ISO 3071, 2009. Tekstil-Sulu Özütleme ph Tayini.

10. ASTM D3107-07:2015. Standard test Methods for Stretch Properties of Fabrics Woven from Stretch Yarns.
11. Çetiner, S., 2006. Seçilmiş Denim Kumaş ve Dikiş İpliklerinde Yıkama İşleminin Dikiş Performansı Üzerindeki Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Kahramanmaraş, 48.
12. Toksöz, M., Mezarciöz, S., 2013. Denim Kumaşlara Uygulanan Özel Yıkama Uygulamaları. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(2), 141-147.
13. Bahadır Unal, Z., Sekeroglu., S., 2017. Research of Required Qualifications for Baby Clothes from Past to Present, Aksaray J. Sci. Eng. 1(2), 71-85.
14. Baykuş D., Oğulata, R.T. 2019. Denim Kumaşlarda Özlü İplik Kullanımının Elastikiyet ve Kalıcı Uzama Özelliklerine Etkisi, Tekstil ve Mühendis, 26 (116), 372-380.

## Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi Yazım Kuralları

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi mühendislik bilimlerindeki güncel bilimsel ve teknik gelişmeleri araştırmacılara ve mühendislere ulaştırmayı hedeflemektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi daha önce başka hiçbir yerde yayımlanmamış, özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları içeren makale ve kısa bildirimleri ile Dergi'de daha önce yayımlanmış makalelerle ilgili tartışmaları kabul etmektedir. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. Makaleler Türkçe veya İngilizce olabilir. Dergi'ye gönderilen yazılar yayınlansın veya yayınlansın iade edilmez. Makaleleri yayınlama yetkisi dergi yayın kuruluna aittir.

Makalenin tamamı bilgisayar ortamında hazırlanmalı baskıya hazır biçimde iki adet (birisinde yazar adları ve adresleri olmamak üzere) **Dergi web sayfasında verilen örnek şablona uygun hazırlanmış olarak elektronik ortamda veya e-posta ekinde gönderilmelidir.**

Makale, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Windows uyumlu Word ortamında, Times New Roman font kullanılarak, birer aralıkla yazılmalı, ana başlıklar 12 Punto (koyu), yazar adları 12 Punto (koyu), alt başlıklar ve metin 10 punto olmalıdır.

Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 15 sayfadan, kısa bildirimler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır. **Makale Türkçe ise: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Öz, Anahtar Kelimeler, Abstract** (İngilizce öz), **Keywords, Metin, Semboller** (gerekliyse), **Teşekkür** (gerekliyse) ve **Kaynaklar**,

**Makale İngilizce ise: İngilizce Başlık, Türkçe Başlık, Abstract, Keywords, Öz** (Türkçe öz), **Anahtar Kelimeler, Text, Notations** (gerekliyse), **Acknowledgments** (gerekliyse) ve **References** sırası içinde düzenlenmelidir.

**Başlık** kısa ve açık olmalı, içeriği yansıtılabilmelidir. **Öz** (ve **Abstract**) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 150 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç, en fazla beş tane anahtar kelime verilmelidir. Başlık, Öz ve İngilizce başlıklı Abstract birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır. **Metin** yalnız bir dil ve anlatımla yazılmalı, makale Türkçe ise Türkçe, makale İngilizce ise İngilizce yazım kurallarına uygun olmalıdır.

Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır. Denklemler numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalıdır. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.

Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:

**Makale ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. makalenin tam başlığı. derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları.

**Kitap ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. kitabın tam adı. cilt numarası, varsa editörü, yayımlandığı yer, son sayfa no.

**Bildiri ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. bildirim tam başlığı. konferansın adı, yapıldığı yer.

**Elektronik ortamdan alınmış ise:** Bildiri sadece CD/DVD'de yayınlanış ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl, bildirim adı. konferansın adı (CD/DVD), yapıldığı yer, yıl. "Konferansın adından hemen sonra parantez içerisinde CD/DVD olduğu belirtilecektir."

**Tez ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi., yıl. tezin adı. derecesi, sunulduğu kurum, son sayfa no.

**Rapor ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl. raporun adı. türü, numarası, kuruluşun adı, yayımlandığı yer.

**Web Sitesi ise:** Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, varsa yayımlandığı yıl. yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

**Kurum/Kuruluşlara ait ise;** Kurum adı, varsa yayımlandığı yıl. yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

**Elektronik kitap/rapor ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi veya kitap/raporu yayımlayan kurum veya kuruluşun adı, varsa yayımlandığı yıl, konunun tam adı, Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.