

**YAYINCI**  
PUBLISHER



# MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ

**JOURNAL OF ENGINEERING  
SCIENCES AND DESIGN**

**e-ISSN: 1308-6693**

**Cilt/Volume: 8 Sayı/Issue: 1 Mart/March 2020**



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

Erdal AYDEMİR, *Suleyman Demirel University, TR*

Turgay AYDOĞAN, *Suleyman Demirel University, TR*

Mehmet AVCAR, *Suleyman Demirel University, TR*

Ali AGCAL, *Suleyman Demirel University, TR*

Çağlayan BALKAYA, *Suleyman Demirel University, TR*

Atilla BAYRAM, *Van Yuzuncu Yıl University, TR*

Mehmet Ali BELEN, *Artvin Coruh University, TR*

Habib GURBUZ, *Suleyman Demirel University, TR*

Baris GUREL, *Suleyman Demirel University, TR*

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

Ecir Ugur KUCUKSILLE, *Suleyman Demirel University, TR*

Alper KUSCU, *Suleyman Demirel University, TR*

Mehmet Onur OLGUN, *Suleyman Demirel University, TR*

Mehmet OZCELIK, *Suleyman Demirel University, TR*

Savas OZUN, *Suleyman Demirel University, TR*

Yunus PAMUKOĞLU, *Suleyman Demirel University, TR*

Olçay POLAT, *Pamukkale University, TR*

Hakan TONGAL, *Suleyman Demirel University, TR*

Volkan UZ, *Izmir Institute Of Technology, TR*

Sibel YIGITASLAN, *Suleyman Demirel University, TR*

Demet YILMAZ, *Suleyman Demirel University, TR*

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

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

Ravi SANKAR, *University of South Florida, USA*

Alice E. SMITH, *Auburn University, USA*

Bedri TUC, *Baskent University, TR*

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

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

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

Turgay AYDOĞAN, *Suleyman Demirel University, TR*



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

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

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

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

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

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

<a href="#">KOCAELİ VE ÇEVRESİ İÇİN COULOMB GERİLME ANALİZİ</a>	1-11
Elçin Gök, Mustafa Erdem, Çağlar Özer	
<a href="#">ESTABLISHING A MESH NETWORK WITH BLUETOOTH AND INVESTIGATING THE RANGE ANALYSIS</a>	12-19
Muhammed Hasan Tanrıöven, Kubilay Taşdelen	
<a href="#">DALDIRMALI KAPLAMA SİSTEMİ İLE 2B MALZEMELERİN KAPLANMASI</a>	20-32
Özge SAĞLAM	
<a href="#">BİR BİLEK ORTEZİ İÇİN PASİF REHABİLİTASYON VE DİRENÇLİ EGZERSİZ UYGULAMA MODLARININ GELİŞTİRİLMESİ</a>	33-41
Ergin Kılıç, Özgür Başer	
<a href="#">ÇİMENTO ESASLI KÖPÜK SIVANIN FİZİKSEL, MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLERİ</a>	42-53
Metin Davraz, Yasin Gökçe, Murat Kuru, Ali Ekrem Akdağ	
<a href="#">EVALUATION OF TWO DIFFERENT WOOD TYPES IN TERMS OF DURABILITY AND TREATABILITY</a>	54-64
Barış GÜNEŞ	
<a href="#">İZOTROPİK MALZEMELERİN SÜNEK KIRILMA GEZENEKLERİNİN TAYİNİ</a>	65-73
Fuzulî Akcay	
<a href="#">SALDA GÖLÜ HAVZASI GÜNEYİNİN (YEŞİLOVA/BURDUR) HİDROJEOLJİSİ VE HİDROJEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELEMESİ</a>	74-90
Simge Varol, Mutlu Küçük, Ayşen Davraz, Şehnaz Şener, Erhan Şener, Fatma Aksever, Bülent Kırkan, Ahmet Tokgözlü	
<a href="#">YÜK VAGONU BOJİSİ TASARIMINDA ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİKLERİ İLE MALZEME SEÇİMİ</a>	91-104
Muhammet Hüseyin Çetin, Gülüstan Tuğçe Alvalı	
<a href="#">WEIGHTING THE UNIVERSAL DESIGN PRINCIPLES USING MULTI-CRITERIA DECISION MAKING TECHNIQUES</a>	105-118
Yavuz Özdemir, Şahika Özdemir	
<a href="#">BİR KAMU İDARİ HİZMET BİNASININ MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ</a>	119-130
Cevdet Emin Ekinci, Nurdan Baykuş, Sevil Ay, Melek Akgül, Belkıs Elyiğit	
<a href="#">SICAKLIK KONTROLLÜ MİKRODALGA KURUTUCU GELİŞTİRİLMESİ VE PORTAKAL KURUTMA PERFORMANSININ BELİRLENMESİ</a>	131-138
Hakan Polatçı, Muhammed Taşova	
<a href="#">NUMUNE GEOMETRİSİ VE YÜKLEME HIZI KOŞULLARININ KAYA MALZEMELERİ DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI DEĞERLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ</a>	139-145
Eren KOMURLU	
<a href="#">İKİZ MERDANE YÖNTEMİ İLE 1XXX SERİSİ ALÜMİNYUM LEVHA ÜRETİMİNDEKİ PROSES PARAMETRELERİNİN ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ</a>	146-152
Hediye Aydın, Remzi Gören, N. Merve Cengiz	
<a href="#">PÜSKÜRTME BETONUN YAKLAŞIK MALİYET ANALİZİ İÇİN UYGULAMA GELİŞTİRİLMESİ</a>	153-164
Melda Alkan Çakıroğlu, Ahmet Ali Süzen, İlkenur Şentürk	
<a href="#">A NEW METHOD FOR THE AUTOMATIC DETECTION OF VENTRICULAR AND ATRIAL PREMATURE CONTRACTIONS</a>	165-174
Zahide Elif Akin, Süleyman Bilgin	
<a href="#">SICAK PLAKA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ PA6 VE CAM ELYAF KATKILI TÜREVLERİNİN NEM ALMA DAVRANIŞININ KAYNAK MUKAVEMETİNE ETKİSİ</a>	175-184
Sami Sayer, Can Özyaman, Çiçek Özses	
<a href="#">SOKAK AYDINLATMALARINDA KULLANILACAK YÜKSEK GÜÇLÜ LED'LERİN TERMAL PERFORMANSININ SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ</a>	185-197
Burcu Çiçek, Necmettin Şahin	
<a href="#">OLASILIK TABANLI YAKLAŞIM KULLANARAK METAL ŞEKİLENDİRME İŞLEMİNDE GERİ YAYLANMA, BURUŞMA VE İNCELME PROBLEMİNİ EN AZA İNDİRECEK YENİ BİR TASARIM METODOLOJİSİ</a>	198-209
Oğuz KAYABAŞI	



<i>ÇEKVALF SİSTEMLİ HOUSİNG KAPAĞININ TASARIMININ GELİŞTİRİLİP PROTOTİP PARÇA ÜZERİNDE TESTLERİN YAPILMASI</i>	210-220
<i>Ömer Şaban Kamber</i>	
<i>KİL BİR ZEMİNİN TAŞ KOLON YÖNTEMİYLE İYİLEŞTİRİLMESİNDE OPTİMUM ALAN YERLEŞİM ORANININ BELİRLENMESİ</i>	221-228
<i>Baki BAĞRIAÇIK</i>	
<i>N-HEKZADEKAN/MONTMORİLLONİT KOMPOZİT FAZ DEĞİŞTİREN MADDELERİN HAZIRLANMASI VE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ</i>	229-239
<i>Hatice Hande Mert, Mehmet Selçuk Mert, Emine Hilal Mert</i>	
<i>EŞ KANALLI AÇISAL PRESLEME (EKAP) UYGULANAN GEMİ İNŞA ÇELİĞİNİN İÇYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ</i>	240-251
<i>Dursun Murat Sekban</i>	
<i>STATION KEEPING OF WIND DRIVEN STRATOSPHERIC BALLOON VIA PROPULSION UNIT</i>	252-261
<i>Öznur Kayhan</i>	
<i>F KLAVYE İÇİN METİN ANALİZİ TABANLI KELİME TAMAMLAMA SİSTEMİ</i>	262-272
<i>Bergen Karabulut, Halil Murat Ünver</i>	
<i>LEAGUE CHAMPIONSHIP ALGORITHM FOR LAYER MODULI ESTIMATION OF FULL-DEPTH ASPHALT PAVEMENTS</i>	273-284
<i>Onur PEKCAN</i>	
<i>NESNELERİN İNTERNETİ İÇİN HİBRİT UYGULAMA KATMANI PROTOKOL TASARIMI</i>	285-304
<i>Erdal ÖZDOĞAN, O. Ayhan ERDEM</i>	
<b>Derleme Makaleler / Review Articles</b>	
<i>ÇİMENTO VE UÇUCU KÜL BÜNYESİNDEKİ AĞIR METALLERİN ETKİLERİNİN HİDRATASYON VE ÇEVRE SAĞLIĞI AÇISINDAN İNCELENMESİ</i>	305-313
<i>Gökhan Kaplan, Ali Uğur Öztürk, Afife Büşra Uğur Kaplan</i>	
<i>SİVİL HAVACILIKTA ELEKTRİKLİ YER HİZMETLERİ TEÇHİZATI KULLANIMI FAYDALAR, KISITLAR VE ÖNERİLER</i>	314-325
<i>Melih Yıldız, Savaş Mutlu</i>	
<i>ALOE VERA'NIN GIDA ENDÜSTRİSİNDE KULLANIMI</i>	326-332
<i>Gülden Başyığıt Kılıç, Damla Bilecen Şen, Dania Alnakdalı, Müberra Gülşen</i>	



## KOCAELİ VE ÇEVRESİ İÇİN COULOMB GERİLME ANALİZİ

Elçin GÖK<sup>1\*</sup>, Mustafa ERDEM<sup>1</sup>, Çağlar ÖZER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup> Atatürk Üniversitesi, Deprem Araştırma Merkezi, Erzurum, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Coulomb, Gerilme Analizi, Deprem, Kocaeli.</i>	17 Ağustos 1999, Mw=7.6 büyüklüğündeki Kocaeli depremi, Marmara Denizi içine uzanan Kuzey Anadolu Fayının büyük bir deprem üretme olasılığını ve Marmara Bölgesi için Deprem Riski ve Sismik Tehlike analizinin önemini ortaya çıkarmıştır. Çalışma alanında gelişen hareketlenmeye bağlı olarak oluşan depremler zaman zaman gerilmeyi değiştirmekte ve buna bağlı olarak bu bölgede oluşacak gerilimi incelemeye olanak sağlamaktadır. Coulomb gerilme değişimlerinin hesaplanmasıyla artçı depremler ve ana depremlere bağlı olarak meydana gelen gerilme artışı ve gerilmenin azaldığı yerler belirlenebilmektedir. Ayrıca deprem ve fay ilişkisi kurularak bölgedeki diğer fay ve depremler arasında bağlantı kurulmasına ve gelecekte deprem oluşacak yerlerin belirlenmesine imkan vermektedir. Bu çalışma kapsamında, Kocaeli’nde Coulomb gerilme analizi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Çalışmada, Coulomb programı kullanılarak 1990-2016 yılları arasında Marmara bölgesinde meydana gelen depremler kullanılmıştır. Marmara denizinde 6 adet model oluşturulup fayların Coulomb gerilme değişimleri ortaya konmuştur. Modellerde deprem ve fay parametrelerinin kullanıldığı Coulomb gerilmesi hesaplamaları ile gerilme artışının ve azalmasının Marmara denizinde ve çevresinde gösterdiği sonuçlar elde edilmiştir.

## COULOMB STRESS ANALYSIS OF KOCAELİ AND SURROUNDINGS

Keywords	Abstract
<i>Coulomb, Stress Analysis, Earthquake, Kocaeli.</i>	17 August 1999, Mw = 7.6 Kocaeli Earthquake, revealed the possibility of producing a great earthquake in the North Anatolian Fault extending into the Marmara Sea and the importance of the Earthquake Risk and Seismic Hazard Analysis for the Kocaeli city and all Marmara Region. The earthquakes that occur due to the movement that develops in the study area change the stress from time to time and accordingly it enables to investigate the stress in this region. Investigation of Coulomb stress changes can be used to determine the location where stress increases and decreases due to the aftershock and main earthquakes. Besides, earthquake and fault related to allow connection between other faults and earthquakes in the region and to determine places where earthquakes will occur in the future. In this study, Coulomb stress analysis was applied in Kocaeli and the results obtained were interpreted. Earthquakes occurred in the Marmara region between 1990 and 2016 using the Coulomb program. 6 fault model were made in the Marmara Sea and Coulomb stress changes of the faults were revealed. The Coulomb stress analysis using the earthquake and fault parameters in the models show the results of increase and decrease of stress in and around Marmara sea.

### Alıntı / Cite

Gök, E., Erdem, M., Özer, Ç. (2020). Kocaeli ve Çevresi için Coulomb Gerilme Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 1-11.



<b>Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)</b>	<b>Makale Süreci / Article Process</b>	
E. Gök, 0000-0002-2643-1453	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	10.12.2018
M. Erdem, 0000-0002-5236-9163	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	23.05.2019
Ç. Özer, 0000-0001-5401-2013	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	25.06.2019
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Bir deprem çalışmasının ana hedeflerinden biri gelecekte deprem olma ihtimali olan bölgelerin araştırılmasıdır. Bu hedefe ulaşmada depremi oluşturan süreçlerin iyi bir şekilde anlaşılması önem taşımaktadır. Deprem tehlikesi olan aktif fay bölgelerinde, depremler nedeniyle oluşan gerilme değişimleri tehlikeli bölgelerin tahmin edilmesi açısından oldukça önem taşımaktadır. Bir deprem kendisinden sonra meydana gelebilecek depremlerin normal oluş zamanını öne çekebilme, geciktirebilme veya başka fayları tetikleyebilmektedir (Stein vd., 1997; Çakır vd., 2003; Nalbant, 2005). Yerkabuğunda meydana gelen deformasyonlara bağlı olarak özellikle önceki zayıflık zonları üzerinde düşük hızda bir gerilme birikimi meydana gelmekte ve bu gerilmeler depremlerle boşaltılmaktadır. Bir fay düzleminde gelişen yeniden kırılma ve kaymaya bağlı olarak oluşan depremler gerilmeyi düşürmekte ve deprem fayı üzerinde yeni bir gerilme birikim süreci başlamaktadır. Yeniden artan efektif gerilme fayın maksimumuna ulaştığı noktalarında yeni gerilmelerin ve depremlerin oluşmasına sebep olabilmektedir (Chinery, 1963). Deprem hareketi sırasında meydana gelen yer değiştirmelerin neden olduğu Coulomb gerilme değişiminin, yakınındaki faylar üzerindeki kırılma gerilmesine olan etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmektedir (Harris ve Simpson, 1992; Stein vd., 1992, 1997; King vd., 1994; Hubert vd., 1996; Harris, 1998; Nalbant vd., 1998; King ve Cocco, 2000). Deprem öncesinde, sonrasında ve sırasında çalışılan alandaki gerilme bölgelerinin saptanmasında Coulomb gerilme analizi en etkin yöntemlerden biridir. Bu yöntem kullanılarak yapılan birçok çalışma ile güvenilir sonuçlar elde edilmektedir.

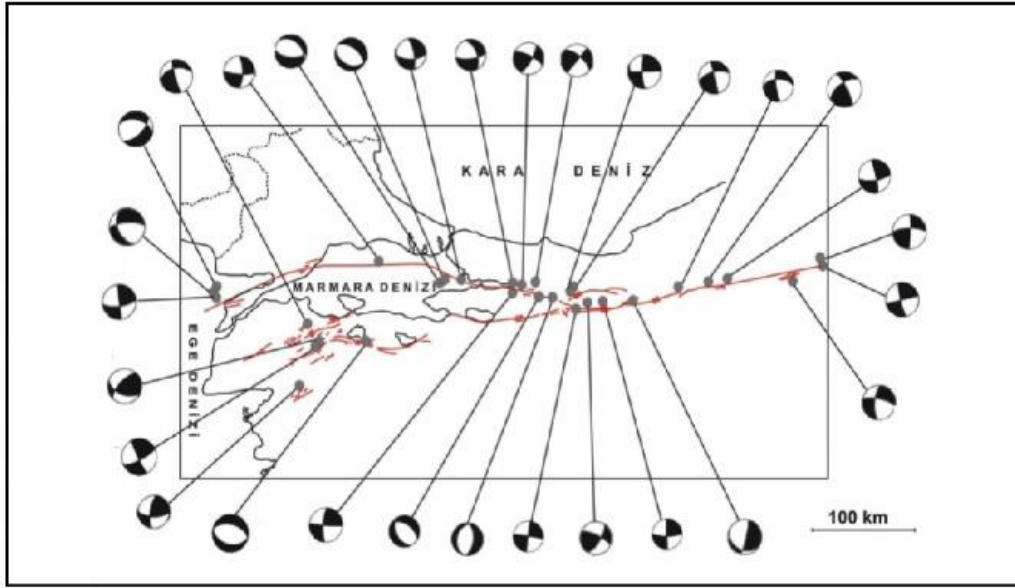
Bu çalışma, Kocaeli ili ve çevresi özelinde başlamış ancak ilerledikçe tüm Marmara Denizi'ndeki fay modelleri kullanılması yöntemin başarısını artırmak ve tüm bölgeyi incelemek için uygun görülmüştür. Bölgenin tamamı deprem tehlikesi açısından değerlendirilmiş ve böylece ileride yapılacak çalışmalara ışık tutması amaçlanmıştır. Bu sebeple çalışmada, 1990-2016 yılları arasında Marmara bölgesinde moment büyüklüğü (Mw) 4.0 ile 7.6 arasında meydana gelen depremlerin Marmara denizinde belirlenen senaryo fay zonunda gelişen gerilme alanı değişimlerinin incelenmesiyle gerilme artışlarının olduğu alanların belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. Marmara Bölgesi Sismotektonik Yapısı ve Depremselliği (Seismicity and Seismotectonics of the Marmara Region)

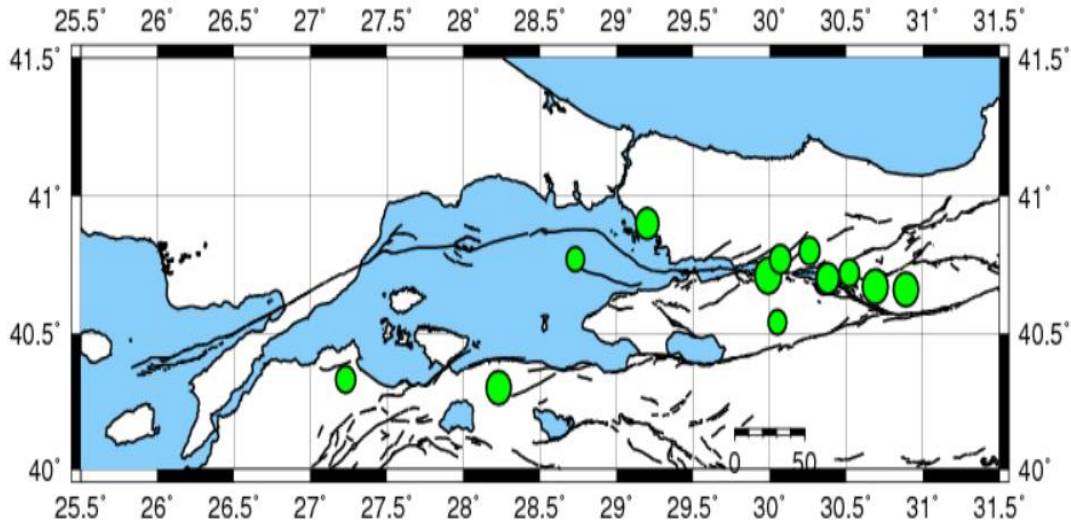
Marmara bölgesi oldukça aktif bir sismositeye ait karmaşık tektonizmaya sahip olan bir bölgedir. Kuzeyde Avrasya levhası ile güneyde güneybatıya doğru hareket eden Anadolu levhası arasında yer alan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Doğu Anadolu sıkışma zonunu Batı Anadolu açılma zonu ile bağlar ve sağ yanal atım bileşenine sahip aktif bir faydır (McKenzie 1972; Şengör 1979). KAFZ, doğuda Karlıova'dan başlayarak batıya doğru geldiğinde üç ana kola ayrılmakta ve Marmara Denizinin içinden ve güneyinden Bursa'dan geçerek Ege Denizi'ne varmaktadır (Yılmaz vd., 2010, Barka ve Kadinsky-Cade, 1988). Marmara Denizi'nin içinde belirgin sırtlarla ayrılmış üç çukurluk yer almaktadır. Bunlar doğuda Çınarcık, orta bölgede Orta Marmara ve batıda Tekirdağ çukurlukları ismini alır (Okay vd., 2000). Geçmişten günümüze bir çok araştırmacı bölgenin deprem tehlikesini araştırmışlardır (Erdik vd., 2004). Marmara Denizi'nden geçen KAFZ'nun tektonik yapısı hakkında birçok fikir öne sürülmüştür. Bunlardan en çok kabul görenlerden bazıları şunlardır; KAF'ın, Marmara Denizi içerisinden tek bir zon halinde geçtiği (Şengör, 1979; 1980; Şengör ve Canitez, 1982; Şengör vd., 1985), Marmara Denizi'nde bulunan önceden bahsettiğimiz bu üç çukurlukların bir graben yapısı taşıdığı (Crampin ve Evans, 1986; Adatepe, 1988; Smith vd., 1995) son olarak da Marmara Denizi'nin bir çek-ayır (pull-apart) yapıya sahip bir havza olduğu araştırmalarla sunulmuştur (Barka ve Kadinsky-Cade, 1988; Wong vd., 1995). 17 Ağustos 1999 (Mw=7.6, Delouis vd., 2002) İzmit depreminin ardından ise tüm modeller yeni çalışmalarla gözden geçirilmiştir. Büyük hasar yaratan bu depremden sonra yapılan çalışmalar ilk modellerin bazılarını destekler nitelikte olmuştur (Armijo vd., 1999, 2002; Carton, 2005 ve Carton vd., 2007; Demirbağ vd., 2003; Imren vd., 2001; Le Pichon vd., 1999, 2001, 2003; Polat vd., 2002a,b). Ayrıca Laigle vd., 2008 ve Becel vd., 2009 ise, yaptıkları çalışmalarda negatif çiçek yapısını öne sürmüşlerdir.

Tarihsel ve aletsel dönemde meydana gelmiş depremler incelendiğinde Marmara bölgesinin depremselliği göreceli olarak çok yüksektir. Marmara bölgesinde, milattan sonra şiddeti IX ve X arasında değişen 18 tarihsel yıkıcı deprem olmuştur. Güncel kayıtlarda ise bölgede 6'dan büyük 13 adet hasar yapan deprem meydana gelmiştir (Ambraseys and Jackson, 2000).

Marmara Bölgesi için, farklı araştırmacılar tarafından yapılan fay düzlemi çözümleri, Şengör vd. (2004) tarafından sunulmuştur (Şekil 1). Bölgedeki odak mekanizma çözümlerine baktığımızda doğrultu atımlı faylanmalarla birlikte normal fayların da oldukça fazla yer aldığını görmekteyiz. Bu da bölgenin karmaşık tektonizmasına işaret etmektedir.



**Şekil 1.** Çalışma bölgesinde oluşan depremlerin odak mekanizması çözümleri (Şengör vd., 2004). (Focal mechanism solutions of earthquakes occurred in the study area.)



**Şekil 2.** Marmara Denizi ve çevresini etkileyen önemli depremler (Taymaz vd., 1991; Taymaz, 1999). (Important earthquakes affecting the Marmara Sea and its surroundings)

Bölgenin depremselliğine genel olarak araştırıldığında, Marmara Bölgesinde 1957-1999 yılları arasında meydana gelmiş, Marmara bölgesi ve çevresinde yıkıcı etkisi olan depremler Şekil 2 ve Tablo 1' de gösterilmiştir.



**Tablo 1.** Marmara Denizi ve çevresinde meydana gelen önemli depremler (M72: McKenzie, 1972; TT91: Taymaz vd., 1991; HRVD: Harvard-CMT; TT99: Taymaz, 1999; USGS: USGS-NEIC) (Significant earthquakes occurred in and around of the Marmara Sea)

Tarih	Zaman	Enlem (derece)	Boylam (derece)	Büyüklik	Derinlik (km)	Kaynak
26.05.1957	06:33	40.66	30.89	Ms=7.0	-	M72
18.09.1963	16:58	40.90	29.20	Ms=6.4	15	TT91
06.10.1964	14:31	40.30	28.23	Ms=6.9	14	TT91
22.07.1967	16:56	40.67	30.69	Ms=7.1	12	TT91
30.07.1967	01:31	40.72	30.52	Ms=5.6	-	M72
05.07.1983	12:01	40.33	27.23	Mb=5.5	10	HRVD
21.10.1983	20:34	40.54	30.5	mb=5.1	14	HRVD
24.04.1988	20:49	40.77	28.73	mb=5.0	19	HRVD
20.06.1943	15:32	40.70	30.38	M=6.3	-	M72
17.08.1999	00:01	40.71	29.99	Mw=7.4	9	TT99
13.09.1999	11:55	40.77	30.7	Mw=5.9	12	TT99
11.11.1999	14:41	40.80	30.26	Mw=5.7	7	USGS

Çalışma kapsamında, KAFZ'nun Marmara Bölgesi'ndeki bölümü modellenirken daha önce yapılmış çalışmalardan hareketle 6 adet farklı fay zonu modeli kullanılmıştır. Modeller tek tek ve birlikte değerlendirilmiştir. Bunlar; doğudan batıya İzmit Fayı, İzmit Fayının kuzey batıya doğru devamında kıyı şeridinde paralel giden bir fay modeli, Çınarcık çukurunun olduğu bölgede Kuzey Sınır Fayı olarak da adlandırılan Fay zonu, Orta Marmara sırtı olarak tanımlanan Orta Marmara Fayı, Tekirdağ çukurunun sınırındaki fay Zonu, en batıda Saros körfezi boyunca uzanan Ganos Fayıdır.

### 3. Coulomb Gerilme Analizi (Coulomb Stress Analysis)

Yerkabuğunda meydana gelen hareketlere bağlı olarak gerilme birikimi meydana gelmekte ve bu gerilmeler depremlerle azalmaktadır. Bir deprem olduğunda ilgili faydaki hareket ile meydana gelen depremler bölgedeki gerilimi azaltmaktadır. Bu gerilim azalımından sonra yeni bir gerilme birikimine kadar deprem tehlikesi azalmaktadır (Chinery 1963). Deprem hareketine bağlı olarak bölgedeki gerilimin artması yakındaki fayların tetiklenmesine sebep olmaktadır. Bölgedeki gerilimin azalması ya da birikimi Coulomb gerilme değişiminin gözlenmesiyle mümkündür. Coulomb gerilme değişiminin saptanmasıyla deprem ve fay ilişkisi kurularak bölgedeki deprem tehlikesi hesaplanabilir. Böylece ileride meydana gelebilecek depremlerin yerleri belirlenebilir (Toda vd., 1998).

Bir deprem hareketi oluştuğunda, bölgedeki faylar üzerindeki mevcut statik gerilme değişmektedir. Bu gerilme değişimi, yer değiştirmeler yöntemiyle hesaplanır (Okada 1985). Bir deprem kendisinden sonra olabilecek depremleri normal zamanından öne çekerek tetikleyebilmekte, bazı durumlarda geciktirebilmektedir. Öncü şokları artçı şoklar ve ana deprem arasında depremin oluşumunu karakterize eden bazı durumlarda direk etkileyen bir ilişki vardır. Bu ilişki depremden sonra faydan uzak bölgelerdeki artçı şokların oluşumları ile kırılmada etkili olan kayma gerilmesi değişimi arasındaki bağıntı ile açıklanmaya çalışılmıştır (Kılıç ve Kalyoncuoğlu, 2015; Das ve Scholtz, 1981). Hasar yaratan yıkıcı bir büyük depremin ardından yapılan çalışmalar ile deprem olmadan önce ve sonrasında bölgedeki Coulomb kırılma kriterinin incelenmesiyle kabul edilebilir sonuçlar ortaya çıkmıştır. (Stein vd., 1992; Toda vd., 1998).

Coulomb kırılma kriteri (3.1)'de görülüşü gibi ifade edilir.

$$|\tau| = S_0 + \mu\sigma \quad (3.1)$$

Coulomb kırılma kriteri  $\tau$ , kırılmanın yönüne göre değiştiği için mutlak değer olarak gösterilmiştir.  $S_0$ ; malzemenin dayanım gerilmesi,  $\mu$ , iç sürtünme katsayısı,  $\sigma$ , düzleme etkileyen normal kuvvet olarak tanımlanır.

Coulomb gerilmesindeki değişim  $\Delta\sigma f$  olarak ifade edilir.  $\Delta\sigma f$  kırılma öncesi ve kırılma sonrasındaki kalıcı gerilme değerlerinin farkına eşittir (King vd., 1994).

$$\Delta\sigma f = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma - \Delta p) \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de görüldüğü gibi  $\Delta\sigma$  ve  $\Delta\tau$  kırılma yüzeyine etki eden normal kayma gerilme değerlerindeki değişimler olarak ifade edilirken,  $\Delta p$  ise boşluk sıvı basıncındaki değişimdir. Coulomb gerilmesindeki değişim yani  $\Delta\sigma f$  arttığında ilgili fayın kırılması kolaylaşırken; azaldığında ise kırılma zorlaşır. Kırılma yüzeyinin gerilme eksenini

ile arasındaki açının  $\beta$  olduğu kabul edilirse, Coulomb gerilmesi  $\Delta\sigma_f$ ,  $\beta$  açısının (3.3)'de gösterildiği gibi olması durumunda en büyük değerini alır.

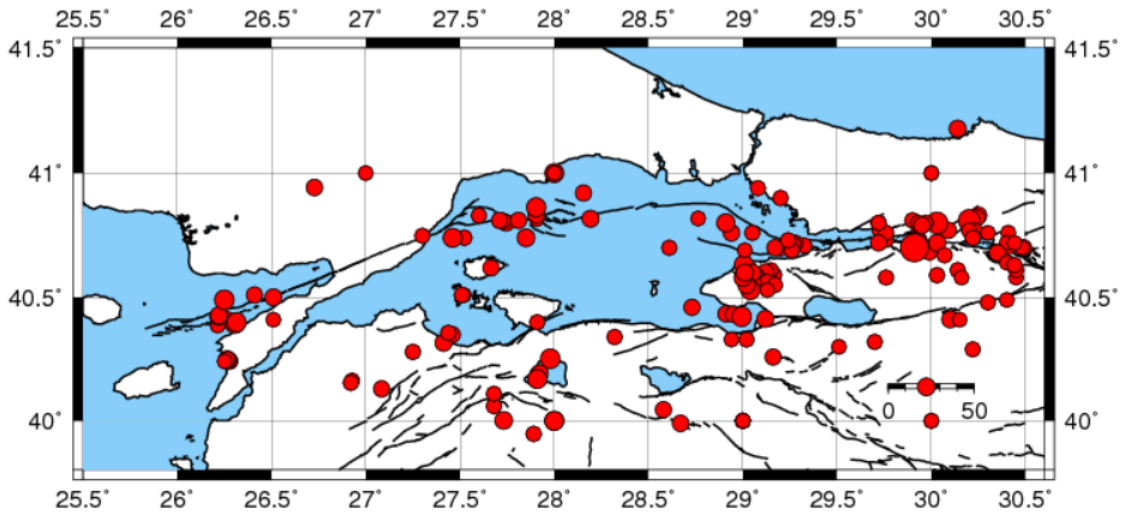
$$\tan 2\beta = \mp \frac{1}{\mu} \quad (3.3)$$

Bölgede deprem hareketi ile ilişkilendirilen direk bir fay bulunmuyor ise Coulomb gerilme değişimi en uygun ya da en yakın faylara göre hesaplanır. En yakın fayın konumu ise elde edilen bölgesel gerilme alanı ile belirlenir (Anderson 1951).

Coulomb gerilme analizi yapılırken, deprem hareketinin neden olduğu gerilme değişimlerinin doğruluğu, değerlendirmede seçilen deprem ve depremler için kullanılan parametrelerin seçimi ile belirlenir. Başlangıçta yapılacak hatalar Coulomb gerilmesi dağılımında önemli sapmalara neden olabilir.

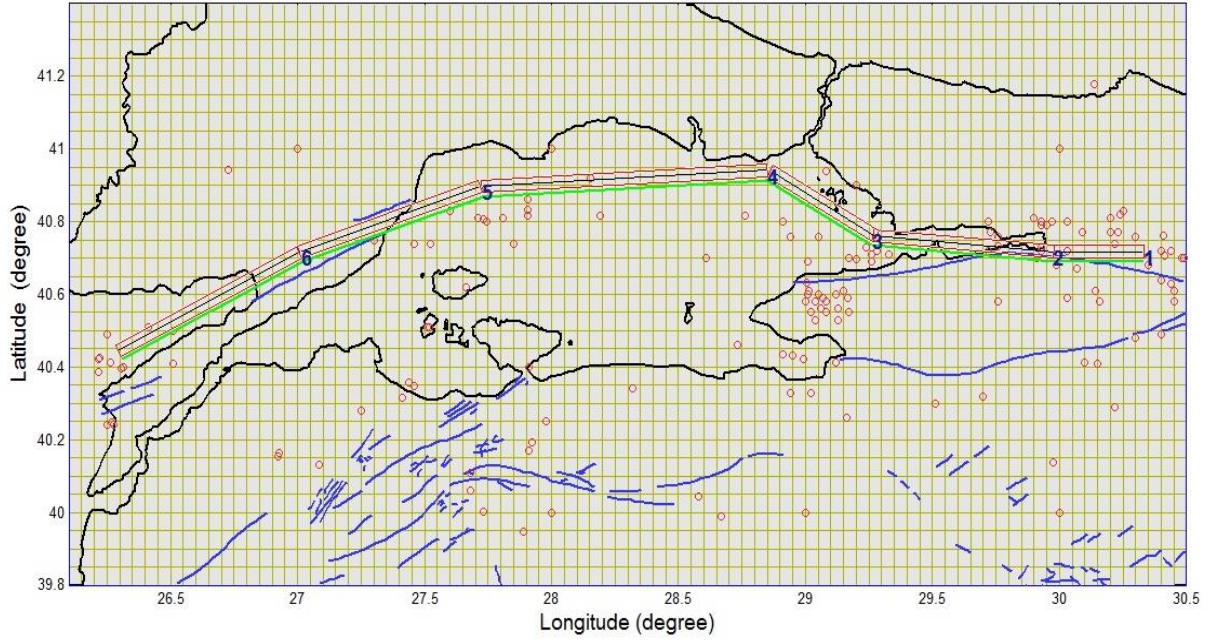
#### 4. Bulgular (Results)

Kocaeli ili ve Marmara denizinin deprem tehlikesini tespit etmek amaçlı yapılan Coulomb Gerilme Analizi için Coulomb3.3 programı kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında 1990-2016 arasında meydana gelen 165 adet, büyüklükleri 4.0 ile 7.6 arasında değişen depremler kullanılmıştır. Depremlerin lokasyon bilgileri AFAD dan alınmıştır (Şekil 3). Çalışma alanı ilk aşamada sayısallaştırılarak referans noktaları oluşturulmuştur. Çalışma alanının kıyı hattı belirlendikten sonra Marmara denizini etkileyen KAF zonunun çalışma bölgesindeki kırık zonu sayısallaştırılmıştır. Fay modellerini elde etmek için MTA diri fay haritası (Emre vd., 2013) ile Çakır vd. (2003)'ün yaptığı çalışmadan faydalanılmıştır. Bölgeyi temsil eden en uygun 6 farklı fay modeli seçilmiş ve bunlar kullanılarak senaryolar oluşturulmuştur(Şekil 4).



Şekil 3. Çalışma kapsamında kullanılan depremlerin episantr haritası (AFAD, <https://depem.afad.gov.tr/>; GMT, Wessel and Smith, 1995) (Epicenter map of earthquakes used in this study)



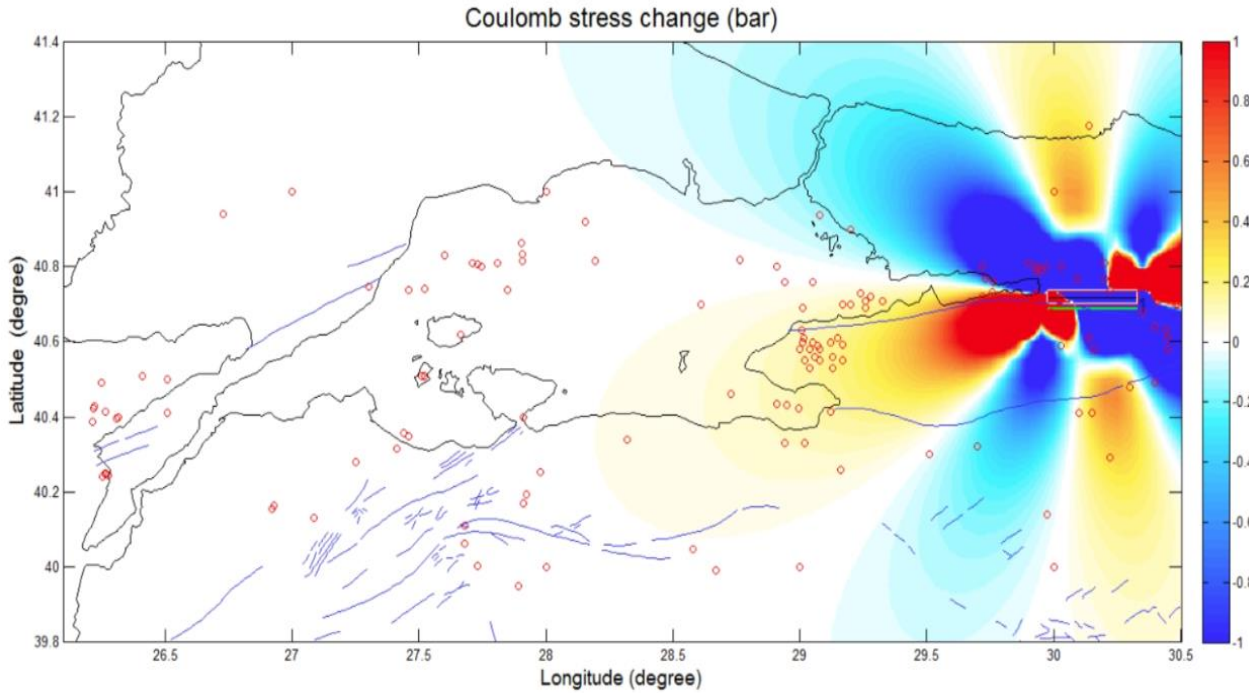


**Şekil 4.** Çalışmada kullanılan fay modelleri ve depremlerin haritası. (Fault models used in this study and epicenter map of earthquakes)

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

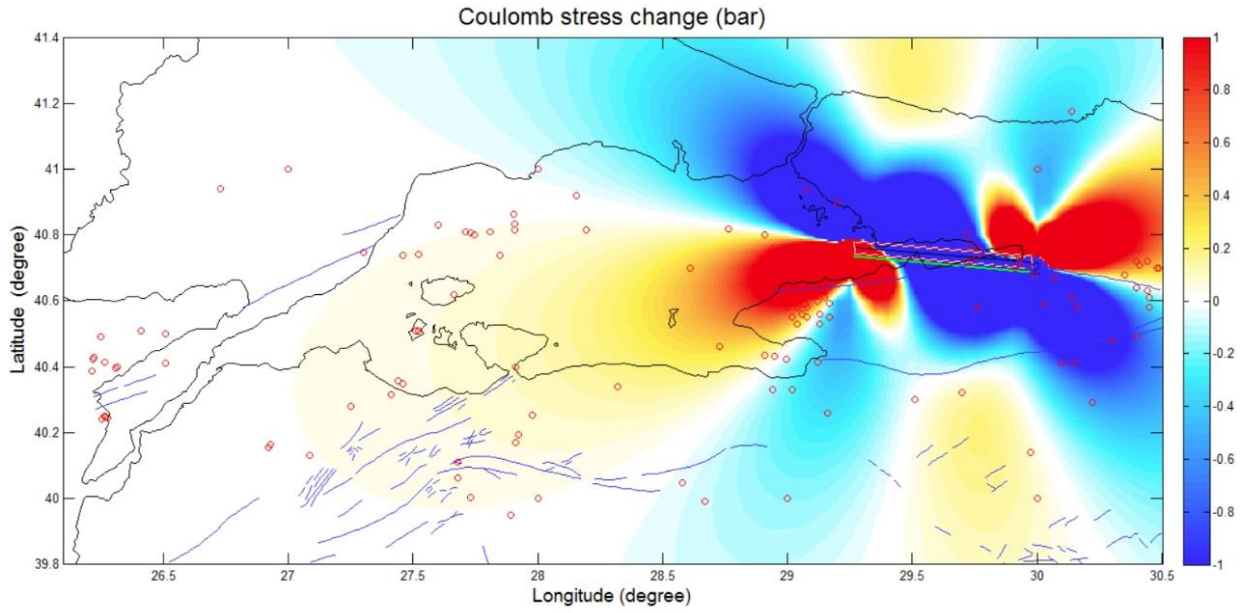
Bu bölümde, bölgeye uygulanan Coulomb Gerilme Analizi yönteminin sonuçları şekiller ile ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi Kuzey Anadolu Fayının Marmara Denizindeki uzantısı olan doğudan batıya doğru yer alan 6 farklı fay modeli üzerinden çalışma yapılmıştır.

İzmit Fayı olarak da adlandırılan 1 nolu fay modeli, tek olarak ve tüm depremler kullanılarak Coulomb gerilme analizi uygulandığında gerilmenin KB-GD yönünde azaldığını buna rağmen İzmit Fayının batısında ve doğusunda gerilmenin yüksek olduğunu görülmektedir (Şekil 5).



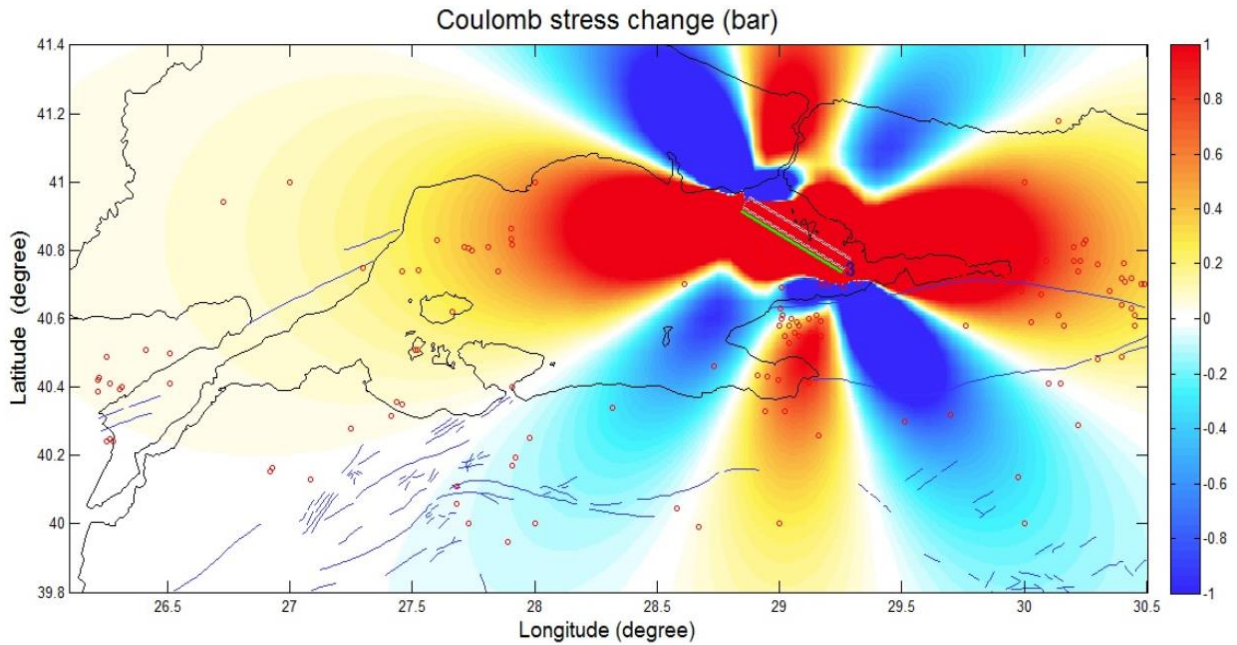
**Şekil 5.** Bir nolu fay modelinin değerlendirilmesi (Evaluation of the number one fault model)

2 nolu fay modeli programda uygulandığında, Şekil 6 'da görüldüğü üzere 1 nolu modeldeki gibi aynı yönde ancak çok daha yüksek bir gerilim azalımı saptanmıştır. 17.08.1999 depreminin lokasyonunun bu fay modeli üzerinde yer alması bu yükselimin sebebidir.



**Şekil 6.** İki nolu fay modelinin değerlendirilmesi (Evaluation of the number two fault model)

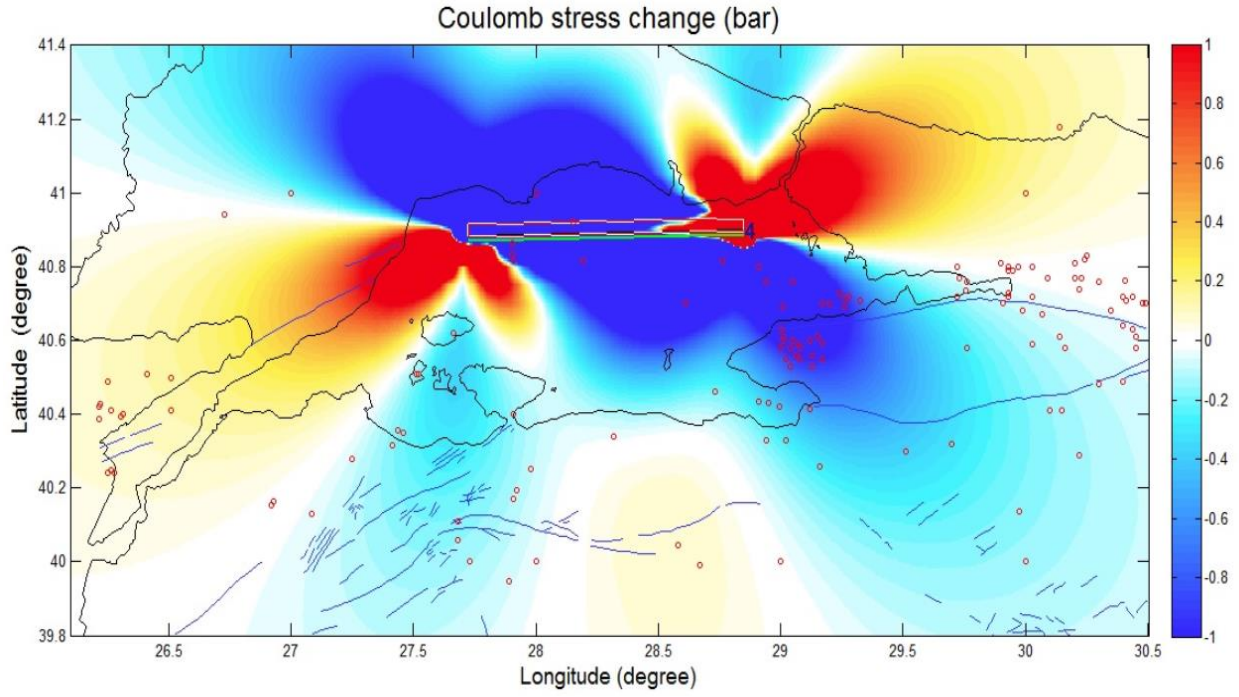
İlk iki fay modelinin doğrultusu yaklaşık doğu-batı yönelimli olmasına rağmen 3 nolu fay modeli KB-GD doğrultulu Kuzey Sınır Fayı olarak da adlandırılan İstanbul il merkezinin kıyı şeridinde paralel yer alan bir fay modelidir. Bu fayın 10.07.1894 tarihinde 9 şiddetinde bir deprem ürettiği yapılan çalışmalarla saptanmıştır (Ambraseys, 2001). Şekil 7'de görüldüğü üzere bu fay modeli programda uygulandığında doğu-batı yönelimli gerilimin çok yüksek olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 7.** Üç nolu fay modelinin değerlendirilmesi (Evaluation of the number three fault model)

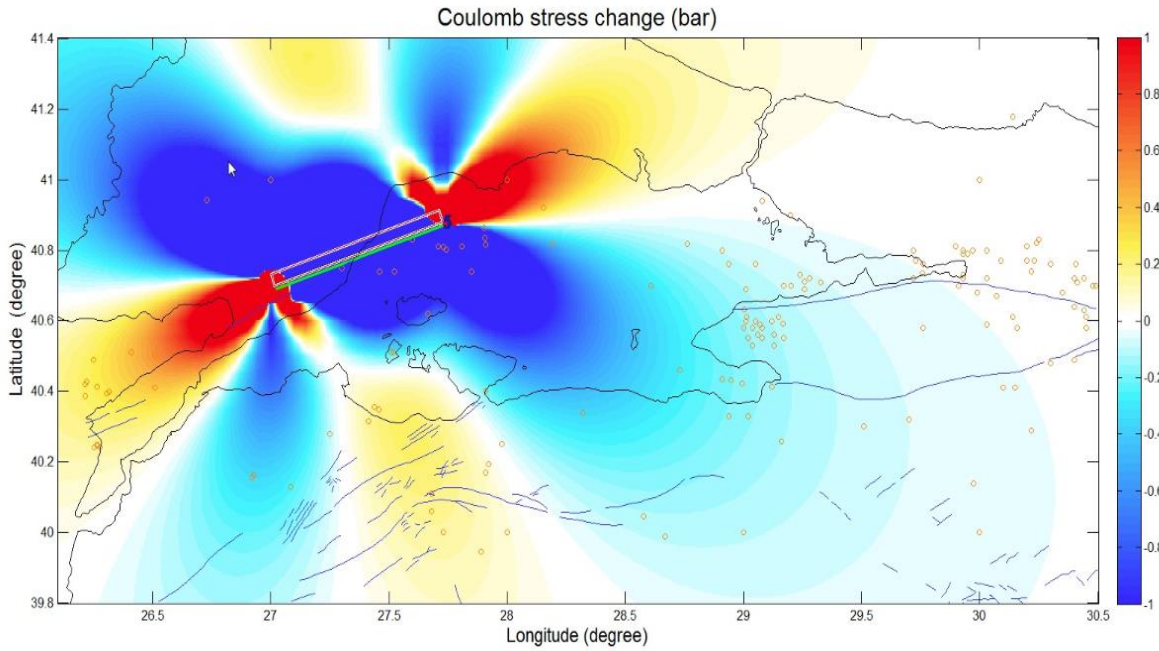
Orta Marmara fayı olarak adlandırılan 4 nolu fay modeli esas alındığında gerilim azalımının KB-GD yönünde çok yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 8).





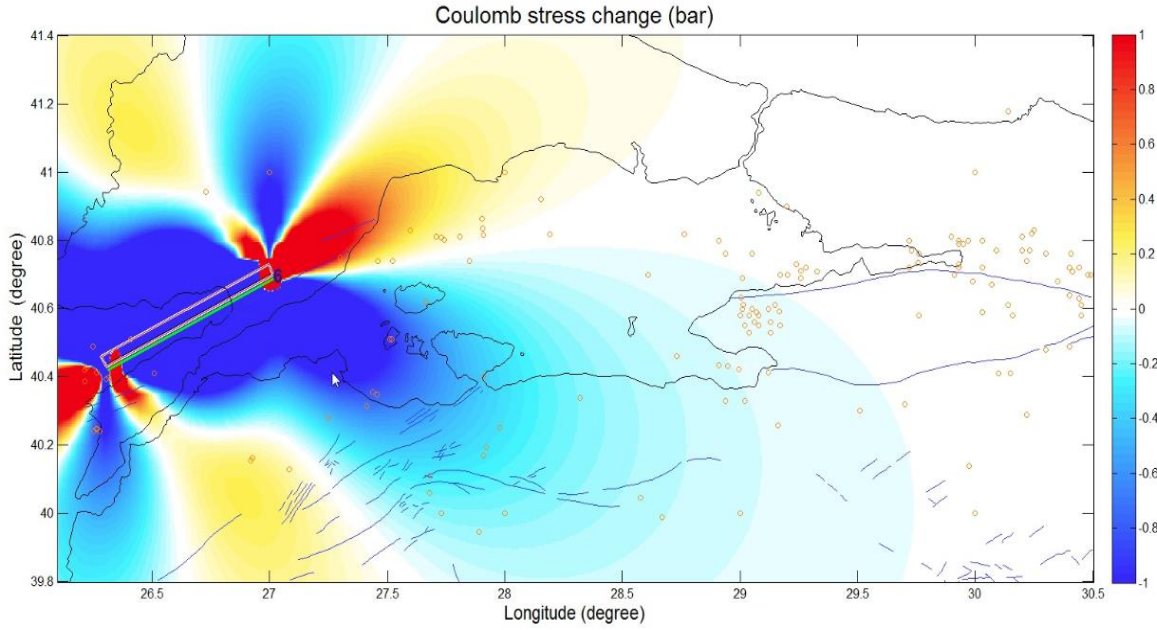
**Şekil 8.** Dört nolu fay modelinin değerlendirilmesi (Evaluation of the number four fault model)

Marmara denizinden Tekirdağ yarımadasında Mürefte'ye doğru KD-GB doğrultulu 5 nolu fay modeli programa uygulandığında, gerilimin yaklaşık KB-GD yönünde oldukça fazla azaldığı ve fayın GB kısmında gerilimin arttığı gözlenmiştir (Şekil 9).



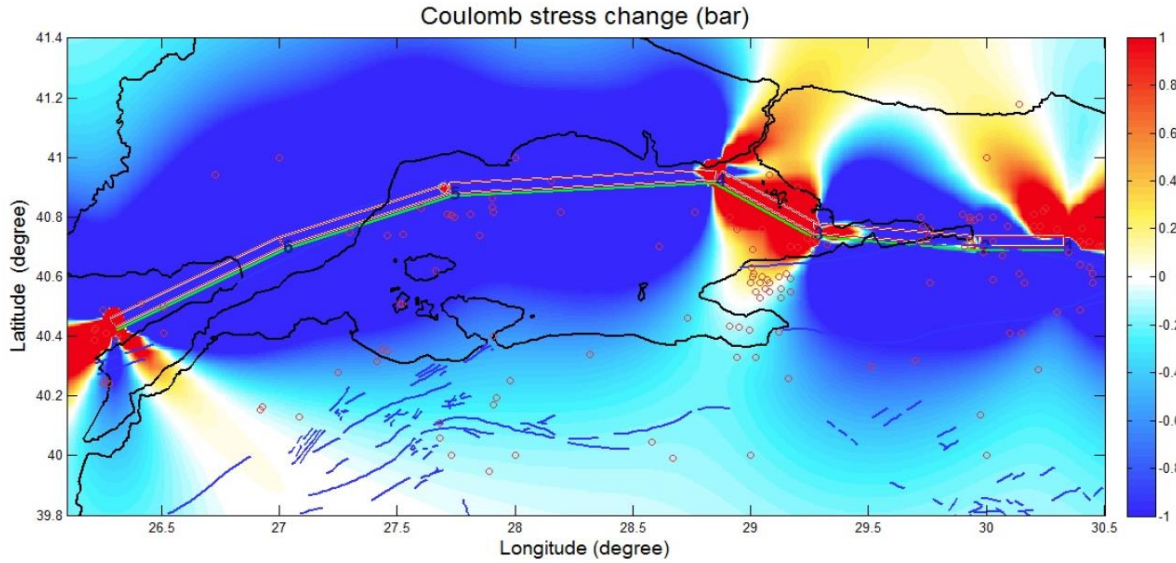
**Şekil 9.** Beş nolu fay modelinin değerlendirilmesi (Evaluation of the number five fault model)

Son olarak Şarköy'den Saroz Körfezi boyunca yer alan 6 nolu fay modeli kullanıldığında yaklaşık doğu-batı yönlü gerilimin azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 10).



**Şekil 10.** Altı nolu fay modelinin değerlendirilmesi (Evaluation of the number six fault model)

Tüm fay modelleri bir bütün olarak Coulomb stress analizi programına uygulandığında, gerilim değişiminin en yüksek 3 nolu fay modeli boyunca elde edildiğini görmekteyiz.



**Şekil 11.** Altı fay modelinin birlikte değerlendirilmesi (Evaluation of six fault models together)

Diğer bölgelerde gerilimin azaldığını bu bölgede ise gerilimin yüksek olduğu görülmektedir. Gerilimin dağınık olması belli bir yönde olmaması, doğrultusu açısından bir yorum yapmamızı engellemiştir (Şekil 11). Bölgenin batısı ve doğusunda görülen gerilim artımının, doğrudan bölgedeki stres değişiminden kaynaklanmadığı o bölgelerde deprem verisinin az olmasından dolayı ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Kocaeli ili ve çevresinde yapılan Coulomb gerilme analizi sonuçlarına göre Kocaeli ve özellikle Marmara Denizi'nde İstanbul kıyı şeridine paralel fay modelinde en yüksek gerilim değişimi bulunmuştur. 1999 Ağustos Kocaeli depreminde yüksek derecede enerji boşalımı olmasına rağmen, Kocaeli ve Marmara Denizi'ni çevresi için deprem tehlikesi hala devam etmektedir.

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

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



**Kaynaklar (References)**

- Adatepe, F.M., 1988. Marmara Denizi Jeofizik Verilerinin Değerlendirilmesi. İ.Ü. Deniz Bilimleri ve Coğrafya Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul (Türkçe).
- Ambraseys, N.N., Jackson, J.A., 2000. Seismicity of Sea of Marmara (Turkey) since 1500, *Geophys J Int*, 141, F1–F6.
- Ambraseys, N. 2001. The earthquake of 10 July 1894 in the Gulf of Izmit (Turkey) and its relation to the earthquake of 17 August 1999. *Journal of Seismology*. Kluwer Academic Publishers. 5 (1), s. 117–128. doi:10.1023/A:1009871605267. ISSN 1573-157X.
- Anderson, E. M., 1951. The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain, Oliver & Boyd, Edinburgh, 206 p.
- Armijo, R., Meyer, B., Hubert, A. & Barka, A., 1999. Westward propagation of the North Anatolian Fault into the northern Aegean: timing and kinematics, *Geology*, 27, 267–270.
- Armijo, R., Meyer, B., Navarro, S., King, G., Barka, A., 2002. Asymmetric slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart: a clue to propagation processes of the North Anatolian Fault? *Terra Nova*, 14, 80–86.
- Barka, A., Kadinsky Cade, K., 1988. Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*, 7, No:3, 663-684.
- Becel, A., Laigle, M., Voogd, B., Hirn, A., Taymaz, T., 2009. Moho, crustal architecture and deep deformation under the North Marmara Trough, from the SEISMARMARA Leg 1 offshore-onshore reflection-refraction survey, *Tectonophysics*, 467, 1–21.
- Carton, H., 2005. Etudes tectoniques en Mediterranee orientale par analyse de données de sismique reflexion: Mer de Marmara Bassin de Cınarcık et merge du Liban, PhD thesis, Institute De Physique Du Globe De Paris.
- Carton, H., Sing, S.C., Party, 2007. Three dimensional Seismic imaging of active pull- 74 Yerbilimleri apart basin: The Cınarcık Basin along the North Anatolian Fault, *J. Geophys. Res.*, 112, doi:10.1029/2006JB004548.
- Chinery, M. A., 1963. The stress changes that accompany strike-slip faulting. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 53, 921-932.
- Crampin, S., Evans, R., 1986. Neotectonics of the Marmara Sea region of Turkey. *J.Geol. Soc. London*, 143, 343-346.
- Çakır, Z., A. Barka, E. Evren, 2003. Coulomb stress interactions and the 1999 Marmara Earthquake sequence, *Turkish Journal of Earth Sciences*, 12, 91-103.
- Das, S. ve Scholz, C.H., 1981. Off-fault aftershock clusters caused by shear stress increase. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 5, 1669-1675.
- Delouis, B., Lundgren, P., Salichon, J. and Giardini, D., 2000. Joint inversion of InSAR and teleseismic data for the slip history of the 1999 Izmit (Turkey) earthquake, *Geophys. Res. Lett.* 27, 3389-3392.
- Demirbağ, E., Rangin, C., Le Pichon X. & Şengör, A.M.C., 2003. Investigation of the tectonics of the Main Marmara Fault by means of deep-towed seismic data, *Tectonophysics*, 361, 1–19.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F. 2013. 1/1.250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi-, Ankara, Türkiye.
- Erdik, M., Demircioğlu, M., Sesetyan, K., Durukal E., Siyahi, B., 2004. Earthquake hazard in Marmara Region, Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 605–631.
- Harris, R.A. ve Simpson, R.W., 1992. Changes in static stress on southern California faults after the 1992 Landers earthquake, *Nature*, 360, 251-254.
- Harris, R. A., 1998. Stress triggers, stress shadows and implications for seismic hazards, *Journal of Geophysical Research*, 103, 24347-24358.
- Hubert, A., King, G.C.P., Armijo, A., Meyer, B. and Papanastassiou, D., 1996. Fault re-activation, stress interaction and rupture propagation of the 1981 Corinth earthquake sequence, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 142, 573-585.
- Imren C., Le Pichon, X., Rangin C., Demirbağ E., Ecevitoglu B., Görür N., 2001. The Anatolian fault within the Sea of Marmara: A new interpretation based on multi- channel seismic and multi-beam bathymetry data. *Earth Planet. Sci. Letter*, 186, 143-158.
- Kılıç C.A., ve Kalyoncuoğlu Ü.Y., 2015. İzmir ili ve Çevresi için Coulomb Gerilme Değişimi ve Depremselliğinin Bölgesel Dağılımı. 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı 14-16 Ekim 2015 ,DEÜ,İZMİR.
- King, G. C. P., Stein, R. S. ve Lin, J., 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bulletin of Seismic Society of America*, 84, 935– 953.
- King, G.C.P.ve Cocco, M., 2000. Fault interaction by elastic stress changes: new clues from earthquake sequences, *Adv. Geophys.*, 44, 1–38.
- Laigle, M., Becel, A., de Voogd, B., Hirn, A., Taymaz, T. & Ozalaybey, S., the Members of the SEISMARMARA Leg1, 2008. A first deep seismic survey in the Sea of Marmara: whole crust and deep basins. *Earth planet. Sci. Lett.*, 270, 168–179.
- Le Pichon, X, Şengör, A.M.C., Taymaz, T., 1999. Büyük Marmara Fayı: niçin, nerede ve ne olabilir? *Cumhuriyet Bilim ve Teknik*, 661, 8-11.
- Le Pichon, X., Şengör, A.M.C., Demirbağ, E., 2001. The active main marmara fault, *Earth planet. Sci. Lett.*, 192, 543–560.
- Le Pichon, X., Chamot-Rooke, N., Rangin, C., Şengör, A.M.C., 2003. The North Anatolian fault in the sea of marmara, *J. geophys. Res.*, 108, doi:1029/2002JB001862.
- McKenzie, D.P., 1972. Active tectonics of the Mediterranean Region. *Geophys. J. Astron. Soc.*, 30, 109-185.
- Nalbant, S.S., Hubert, A., King, G.C.P., 1998. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the North Aegean Sea. *J. Geophys. Res.*, 103 24469-24486.
- Nalbant, S.S, Mc Closkey, J. and Steacy, S., 2005. Lessons on the calculation of static stress loading from the 2003 Bingol, Turkey earthquake. *Earth And Planetary Science Letters*, 235 (3-4). pp. 632-640.
- Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of Seismic Society of America*, 75, 1135-1154.

- Okay, A.İ., Kaşlılar Ö. A., İmren, C., Boztepe G. A., Demirbağ, E., 2000. Geometry of active faults and strike-slip basins in the Marmara Sea, Northwest Turkey: A Multichannel Seismic reflection study. NATO Advanced Research Seminar, Istanbul, Abstracts 20-21. Örgülü, G., 2011.
- Polat O., Haessler, H., Cisternas, A., Philip, H., Eyidogan, H., Aktar, M., Frogneux, M., Comte, D. and Gurbuz, C., 2002a. The Izmit (Kocaeli) Turkish earthquake of August 17, 1999: Previous seismicity, aftershocks and seismotectonics, Bull. Seism. Soc. Am. 92 (1), 361-375.
- Polat O., Haessler, H., Cisternas, A., Philip, H. and Eyidogan, H., 2002b. Analysis and interpretation of the aftershock sequence of the August 17, 1999, Izmit (Turkey) earthquake, J. Seism. 6, 287-306.
- Smith, A.D., Taymaz, T., Oktay, F.Y., Yüce, H., Alpar, B., Başaran, H., Jackson, J.A., Kara, S., Şimşek, M., 1995. Highresolution seismic profiling in the Sea of Marmara (northwest Turkey): Late Quaternary sedimentation and sea-level changes. GSA Buletin, 107/8, 923-936.
- Stein, R.S., King, G.C.P. and Lin, J., 1992. Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude=7.2 Landers earthquake, Science, 258, 1328-1332.
- Stein, R.S., Barka, A., Dieterich, J.H., 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. Geophys. J. Int., 128, 594-604.
- Şengör, A. M. C., 1979. The North Anatolian Transform Fault: Its Age, Offset and Tectonic Significance. Journal of the Geological Society, 136, 263-282.
- Şengör, A.M.C., 1980. Türkiye'nin Neotektoniğinin Esasları, TJK Yayınları.
- Şengör, A.M.C., Canitez, N., 1982. The North Anatolian Fault. Alpine Mediterranean Geodynamics, Geodynamics Series, 7, 205-216.
- Şengör, A.M.C., Görür, N., Şaroğlu, F., 1985. Strike-slip Faulting and Related Basin Formation in Zones of Tectonic Escape: Turkey as a Case Study. StrikeSlip Deformation, Basin Formation and Sedimentation: The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 17, 227-264.
- Şengör, A.M.C., Tüysüz, O., İmren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., Le Pichon, X., Rangin, C., 2004. The North Anatolian Fault: A New Look. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 33, 1-75.
- Taymaz, T., Jackson, J. and Mc Kenzie, D., 1991. Active tectonics of the north and central Aegean Sea. Geoph. J. Int., 106, 433-490.
- Taymaz, T., 1999. Marmara Bölgesi'nin Aktif Tektoniği: 1999 Gölcük-Düzce Depremleri. İTÜ-VAKIF Dergisi, 30 (Aralık 1999), 32-36.
- Toda, S., Stein, R.S., Reasenber, P.A., Dieterich, J.H. and Yoshida, A. 1998. Stress transferred by the 1995 Mw=6.9 Kobe, Japan, Shock: effect on aftershocks and future earthquake probabilities. Journal of Geophysical Research 103. Doi:10.1029/98JB00765. issn:0148-0227.
- Wessel, P., and Smith, W.H.F., 1995. New version of the Generic Mapping Tools (GMT), (EOS Transactions, 1995). 76, p. 329.
- Wong, H. K., Ludmann, T., Uluğ, A. Görür, N., 1995. The Sea of Marmara: a plate boundary sea in an escape tectonic regime. Tectonophysics, 244, 231-250.
- Yılmaz Y., Göktaşan E., Erbay AA., 2010. Morphotectonic development of the Marmara Region. Tectonophysics, 488, 51-70.



## ESTABLISHING A MESH NETWORK WITH BLUETOOTH AND INVESTIGATING THE RANGE ANALYSIS

Muhammed Hasan TANRIÖVEN, Kubilay TAŞDELEN\*

Isparta University of Applied Sciences Graduate Education Institute Department of Electrical and Electronics Engineering, Isparta, Turkey

### Keywords

*Bluetooth,  
Bluetooth Smart,  
Bluetooth Mesh Networks,  
Bluetooth Low Energy,  
Bluetooth Beacons.*

### Abstract

Bluetooth is an effective technology in short range wireless communications. The standards of Bluetooth have been released by the Bluetooth Special Interest Group (SIG) and the release of Bluetooth Low Energy (LE) standard aka. Bluetooth Smart was one of the breakthroughs concerning Bluetooth. LE offers efficient ways to overcome problems regarding the efficiency and energy consumption. Adopting LE to the Internet of Things (IoT) standards has made LE a more acknowledged technology in the market. But there were some problems such as the limited range, not having the IP support. IP support has been released by SIG to overcome the IP problems, but the range and the topology problem remained until the mesh standard has been released. In this paper, the essentials of a mesh network will be mentioned along with a base application that has been performed in a three-story warehouse. The supplies in the warehouse were assigned a LE Beacon which is a member of the mesh network and the absence or the presence of the supply has been monitored via the mesh network.

## BLUETOOTH İLE MESH NETWORK OLUŞTURULMASI VE MENZİL ANALİZİNİN İNCELENMESİ

### Anahtar Kelimeler

*Bluetooth,  
Bluetooth Smart,  
Bluetooth Mesh Ağları,  
Bluetooth Düşük Enerji,  
Bluetooth Beacon.*

### Öz

Bluetooth kısa mesafe kablosuz haberleşmelerde kullanılan etkili bir yöntemdir. Bluetooth Standartları Bluetooth Special Interest Group (SIG) tarafından yayınlanmaktadır. Bluetooth Düşük Enerjinin yayınlanması ile bu teknolojiye bir çığır açılmıştır. Düşük enerji, verimlilik ve enerji tasarrufu açısından karşılaşılan problemlere çözümler üretmiştir. Düşük Enerji teknolojisini Nesnelerin İnterneti standardına uyumlu hale getirmek bu enerjiyi daha tanınır hale getirmiştir. Karşılaşılan IP sorunu ve topoloji sorunları SIG tarafından yayınlanan standartlar ile çözüme kavuşturulmuştur. 2017 yılında yayınlanan mesh standard ile Nesnelerin İnterneti ve Bluetooth Düşük Enerji uyumu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bir Mesh Ağının genel özelliklerinden bahsedilmiş, daha sonra üç katlı bir depoda bulunan nesnelerin takibinin mesh ağı aracılığı ile gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Nesnelerin var veya yok olmaları mesh ağı aracılığı ile takip edilmiştir.

### Alıntı / Cite

Tanrıöven, M. H., Taşdelen, K., (2020). Establishing A Mesh Network with Bluetooth And Investigating the Range Analysis, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(1), 12-19.

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

M.H. Tanrıöven, 0000-0001-8900-390X  
K. Taşdelen, 0000-0001-5664-3898

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	05.02.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	01.04.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	04.04.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: kubilaytasdelen@isparta.edu.tr, +90-246-214-6761

## 1. Introduction

Bluetooth can be classified into two categories and these categories are Bit Rate/ Enhanced Data Rate (BR/EDR) and Bluetooth Low Energy (LE). LE has been introduced with the Bluetooth 4.0 standard. Bluetooth LE constitutes an architecture to ensure a low energy data transfer between the devices. This architecture has control and host parts. The control part consists of the physical layer and the host part consists of the layers that belong to LE. The layers that belong to LE are called as Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP), Attribute Protocol (ATT), Generic Attribute Protocol (GATT), Security Manager Protocol (SMP) and the Generic Access Profile (GAP) (Bluetooth SIG, 2010).

There are roles attributed to the devices in LE. The most important roles are the scanner role and the advertiser role. The advertiser is supposed to advertise the data that the module is supposed to advertise and the scanner scans for the specific data packets and response to the advertised data that it is scanning for. Another set of roles in LE is called Master/Slave roles. The scanner and the advertiser roles are the roles that a device can have before a connection is established. After the connection is established, the devices work in Master/Slave roles and they can transfer data between them. A master can communicate with up to 8 slaves at the same time. After the 4.0 standard, 4.1 and 4.2 standards were released. These standards were released to enhance the LE technology in terms of mesh adaptation and IoT adaptation, but they do not contain an enhanced data rate and enhanced range capabilities (Martelli, 2014).

In 2016, with the release of the 5.0 standard, the data load and the transmission range has been increased. The 31 bytes of the data capacity of the standard 4.0 has been increased to 255 bytes and the connection speed has been increased to 2Mbps from 1Mbps as well as the range has been doubled (Gomez et al., 2012.)

### 1.1. Bluetooth Layers

As mentioned above, the LE architecture has layers which performs the low energy data transfer between the devices and these layers are L2CAP, SMP, ATT, GATT and GAP. L2CAP is placed right above the physical layer and it acts as a multiplexer to relay the data do the layers above. It relays the connection oriented and the connectionless data services to the upper layers (Heydon, 2013).

ATT defines the communication between two devices as server and client. The data packets that will be used by the GATT layer are called as "attributes". The client can have access to the information stored by the server by sending request. And the server can send this information in two different ways which are called as notification and indication. No acknowledgements are required while the server sends data to the client while acknowledgements are required to send the second data packed in indication. Attributes can be classified as readable/not readable and writable/not writable (Gomez et al., 2012).

SMP is defined as a layer where the data is encrypted. This makes a connection more secure and reliable. AES-128 encryption is used in SMP and it can also provide some extra protection as Man in the Middle (MITM) (Zheng et al., 2006).

GATT is the layer where the data exchange happens. GATT defines the rules in the data exchange. It is necessary to mention such concepts as service and characteristics while mentioning GATT. A service can be defined as a collection of data such as data obtained from a sensor. There can be custom defined services in LE as well as there are pre-defined services defined by SIG. A characteristic is defined as how the actual data is represented in a service. To distinguish the attributes that belong to services and characteristics, universally unique identifiers (UUID) are used. There are 2 types of UUIDs available, and they are 16-bit UUIDs and 128-bit UUIDs. 16-bit UUIDs are only used in the services and characteristics that are pre-defined by Bluetooth SIG and the 128-bit UUIDs are used in custom services and characteristics (Faragher and Harle, 2014).

And the last remaining layer, GAP, defines roles such as Scanner, Advertiser, Peripheral and Central. With these definitions, it is safe to talk about the communication topologies that are used in LE (Ko et al., 2011). The communication topologies are categorized into three categories which are:

1. Two devices send and receive data simultaneously
2. One device send data to multiple devices (Beaconing)
3. Multiple devices can send and receive data among each other simultaneously (Mesh)

Before Bluetooth 4.0, Topology Number 1 communication was widely used in device to device communications such as it is used in bluetooth mouse and printers. After the release of Bluetooth 4.0, this topology had been



integrated with the low energy communications and used in such applications as health monitoring devices, smart watches and sports equipment. Beacons allow one device to stream data to many devices. This is used in areas where the static data stream is widely used such as museums, stores and indoor navigation systems. There are many beacon standards that are available to use in the Beacons mode such as iBeacon and Eddystone etc. Mesh topology is designed for allowing multiple devices to communicate among themselves simultaneously. This will be mentioned in greater detail in the following sections.

## 1.2. Bluetooth Mesh

After the release of Bluetooth LE, Bluetooth has become more important in short range wireless communications. But even though LE offers a low energy communication with rather cheaper equipment it still lacks the utilities that can overcome the problems that users face in short range wireless communications. And two of the most vital of these problems are; to be able to cover larger physical areas and to be able to interact with larger number of devices (Gogic et al., 2016). By adopting the already existing mesh topology that is used in wireless communications to Bluetooth LE, these problems can be overcome. The Mesh Standards has been released by Bluetooth SIG and The Mesh has been started to be used in LE officially.

### 1.2.2. Bluetooth Mesh Concepts

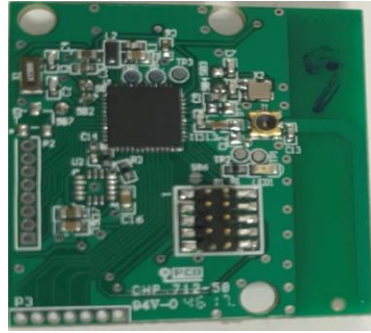
Each device in the Mesh Network is called as a node. Bluetooth Mesh enables us to interact with many nodes, even with the nodes that is out of the coverage area of the main node. This is only possible with the aid of the technique that is called "relaying". Relaying means that an LE node that is in the Mesh Network can both take the data for use or relay the data to other nodes. This way a node can send a message to another node that is not within the reach by using at least one more node as a relay bridge (Maharjan et al., 2014).

There are different methods that are used in Mesh Networks to deliver data packages. The technique that is called as flooding is used in Bluetooth Mesh. Flooding is the technique where the message is received by all nodes in the network. Each message is assigned with a Time to Live (TTL) value and this is used for determining whether the message is to be relayed or not. Each node has a cache memory, and this is used to determine whether the received message is a new message or an old message. This way the older messages can be ignored (Maharjan et al., 2014).

There are four different types of nodes that can be used in a mesh network and they are called as low energy node, friend node, relay node and proxy node. And it is possible to stream data of 23 bytes (as content) with a mesh network application. A device can be introduced to a mesh network by a process that is called as provisioning. The provisioning is a process where an unprovisioned device undergoes a series of operations to be a member of the mesh network. The process can be classified into five steps. The first step is called as Beacons. The unprovisioned node sends a specific data structure as a beacon and announces that it is a node ready to be provisioned. The next step is called as invitation. At this step a layer is established between the provisioner and the unprovisioned device. The provisioner invites the unprovisioned device to the mesh network. Then as the next step the public keys are exchanged between the devices. Then the provisioner authenticates the device that is in the provisioning process and lastly the node addresses and the network keys are delivered to the device, which is called as a node of the network after this (Sirur et al., 2015). In this study a mesh network in a warehouse has been established and the tracking of the objects has been performed by this mesh network.

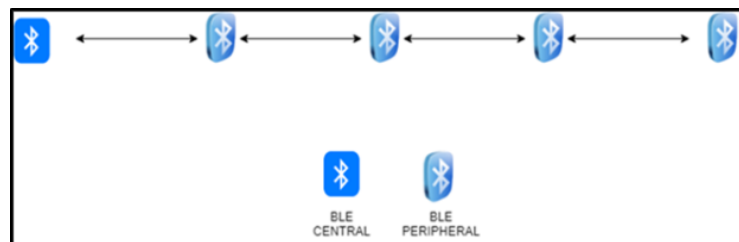
## 2. Materials and Method

In this study a Bluetooth Mesh Network is established, and a simple and local application has been performed. This application sets a basis for further improvements and implementations and it is open for developments. Bluetooth Beacons that has nRF52832 chips on them have been used in this project. nRF52832 is an ARM Cortex M4F 32-bit processor and it has a 512kB flash memory. It is manufactured by Nordic Semiconductors which is one of the leading Bluetooth IC manufacturers in the world. The software that has been used to program nRF52832 is called Segger EMBEDDED STUDIO and this software provides free license when working with the products of Nordic Semiconductors. The beacon that is used in this application is given in Figure 1.



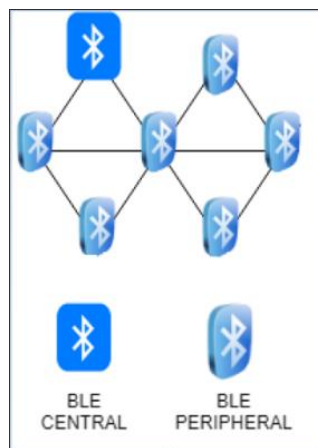
**Figure 1.** The Nordic nRF52832 Beacon

To show the mesh network works properly, a set of experiments have been set up and the “relaying” ability and the “star topology” has been investigated. For the first part the three modules have been placed as it is given in Figure 2. Each module is within the coverage area of the preceding one and the next one. Each device is placed a hundred meters away from each other so that the distance from the central to the furthest peripheral is almost 400 meters. The aim is to send data to the furthestmost module from the central device by using the intermediate modules for relaying the message. The message has successfully been sent to the furthestmost device.



**Figure 2.** The Setup to Show the Relaying Mechanism

The second setup is to be able to reach to a particular device in the mesh network and make it perform the predefined tasks successfully. For that, a setup containing 7 different modules has been used. One of the modules is a central module and the others are peripheral modules. This setup is shown in Figure 3.



**Figure 3.** The star Topology

Each device had been assigned an address and the data had been flooded into the mesh network. Although the data had been received by all nodes, only the target node has acted accordingly. This has shown that each node in the mesh network can be reached through the central device and the predefined tasks can be performed successfully.

For Bluetooth communication to be a healthy communication, the RSSI (Received Signal Strength Indicator) should not be less than -90 dBm. It has been observed that for RSSI above -90 dBm there has never been an interruption in the communication. To see how effective the beacons that are used in this system are, the RSSI measurements have been performed for the highest transmit power configuration. Each beacon can have a specific RSSI range due to the antenna structure and design. And the peripherals also affect the received power strength. For the specific beacon that is used in this study which has a PCB antenna, the RSSI measurements have been performed both in indoors and outdoors. Both the outdoor and the indoor measurements have been performed

when the beacon transmit power is adjusted to +4dBm. The graph that is obtained for the outdoor measurement is given in Figure 4.

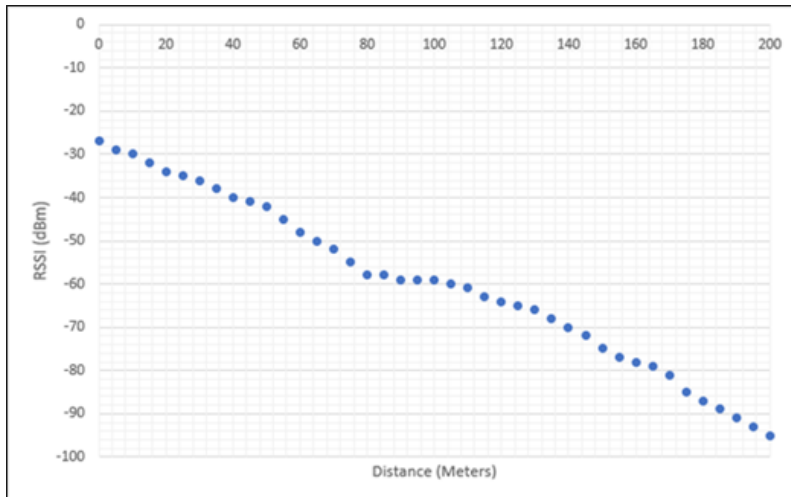


Figure 4. RSSI/Distance Graph in Outdoor Measurements

For the indoor applications there are factors to be considered such as how the concrete in the walls affect the bluetooth signal strength. A strength of a signal over a 30-centimeter-thick wall has been measured by setting up a system as shown in Figure 5.

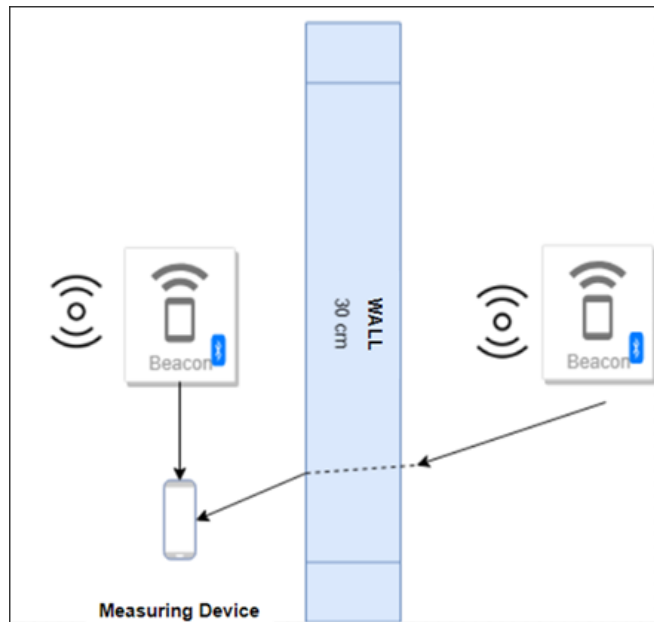


Figure 5. The Setup to Show the effect of Concrete on Bluetooth Signals

The concrete weakens the Bluetooth signals by about 30 dBm as shown in Figure 6. and other peripherals that are made of metals also effect the signal quality. To show the reduction in a better way, the Received Signal Strength Indicator (RSSI) versus time graph has been shown. The fall that is shown in green indicates the power of the Bluetooth signal by the concrete.

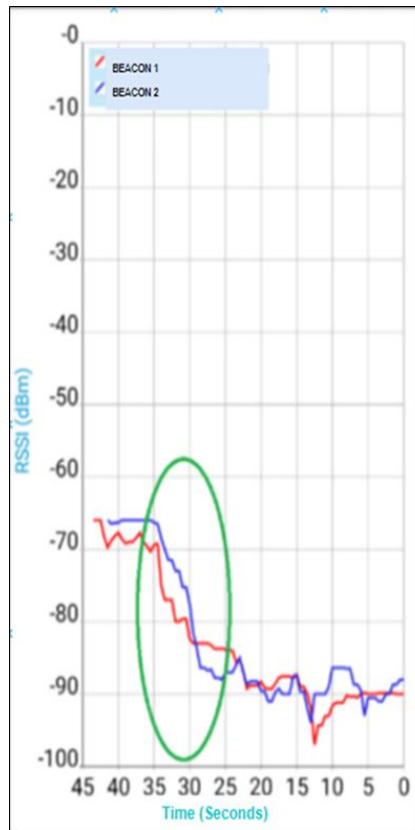


Figure 6. The decrease in RSSI over a wall

For this study, the maximum distance between two beacons is determined to be less than 180 meters for the highest transmit power configuration to maintain a healthy communication in outdoors. In indoors, however, the distance is highly dependent of the structure of the home/office.

For the sake of demonstration, a Bluetooth Mesh network has been developed for a warehouse to perform a simple asset tracking application. In a warehouse with 3 stories that is shown in Figure 7. Six beacons were placed, approximately 10 meters apart from each other to cover the floor grounds and in each floor to ensure full coverage and one extra beacon were placed near the stairs which is shown in red rectangle is placed to ensure that the beacons in different floors are in contact.

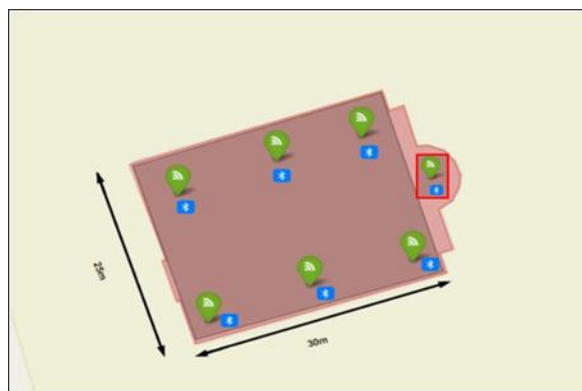
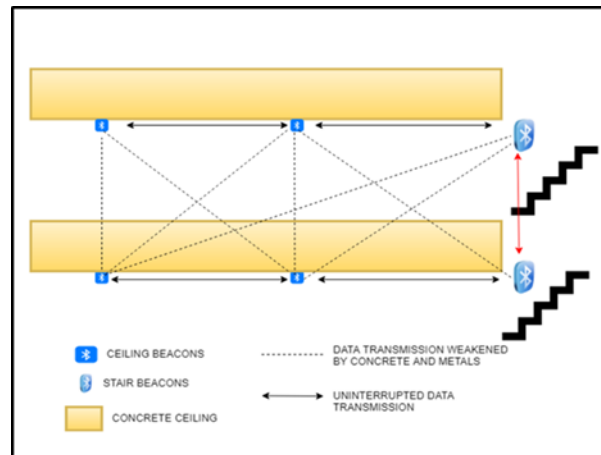


Figure 7. The Warehouse and The Placed Beacons

So, the beacons that is closed to the stairs ensure that the communication will not fail by relaying the content to the upper/lower floor with no loss. The mechanism is shown in Figure 8.





**Figure 8.** The Interaction of the Modules

The dashed lines indicate the data stream that may be interrupted by the concrete or the peripheral objects that may have high metal density around them. But the straight lines indicate that the modules that are placed in different floors remain in contact regardless of what is going on around them. And the red line indicates that the stair beacons make sure the connection between the floors is kept healthy.

### 3. Results

To keep track of the contents that are in the warehouse, a bluetooth beacon assigned to each box. 25 boxes were used in this application to see that the system works effectively. Each beacon that is on a box is a member of the mesh network and once it is in the building, the stationary beacons know the presence of the box and inform the computer. Once the box is moved out of the building, the beacon attached to the box is no longer within the boundaries of the mesh network. The mesh network scans for the existent beacons inside the building in every minute and this way it informs the main device and computer.

A meaningful data set has been constructed to be used in the mesh network application. A 8-byte data set has been determined. The first two bytes represent the device ID. Thus, the system supports up to 255 beacons to be monitored but the dataset can be adjusted to support more devices. The next two bytes are for the presence or the absence of the beacon. And the remaining four bytes are reserved in further uses. The first two of the remaining bytes are considered to be used as the exact location information and the last two bytes are reserved for emergency calls (only in the human tracking applications, they will be either left blank or used for other operations in asset tracking applications.)

By using the Health Messages that is in the Bluetooth Mesh Network Specifications (Bluetooth SIG, 2017) it is possible to detect the health of a node in a network and if a node is moved out of the network the health message indicates that the beacon is doesn't exist in the building anymore, thus letting the authorities know about the situation.

### 4. Discussion and Conclusion

This is an example that sets out a basis for further asset tracking applications with Bluetooth. Before the introduction of mesh networks into the Bluetooth LE, the bidirectional communications among the devices was not possible without connection. And when the master/slave connection topology is concerned, it was only possible to connect at most 8 slaves to one master. In this topology slaves aren't able to talk to each other and they can only communicate with the master. Mesh applications in LE eliminates not only the limitation in the number of supported nodes, but it also enables each individual node to talk to any other individual node as long as there is an uninterrupted communication link between them. Possible and considered improvements on this study that may be conducted in the future are

1. Adding location beacons to the sections of the building floors and letting the beacons that are attached to the boxes work in multiple modes such as mesh network member and LE scanner. This way, we can know the exact location of the box in the building via the mesh network.
2. By using a gateway device that has a LE chip and a wireless module on, we can obtain the data online. And the system can inform the authorities via internet about the activities in a warehouse.

3. This warehouse example can be extended to patient tracking in the hospitals and personal tracking in such places as mines and other places that has risks.

Bluetooth plays an important role in our lives as we embrace the technology more than ever. Using the mesh network applications, the asset and human tracking applications will be easier and practical and more user friendly. Emerging this technology into everyday life will make lives easier

### Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

### References

- Bluetooth, S. I. G. (2010). Bluetooth core specification version 4.0. Specification of the Bluetooth System.
- Bluetooth SIG (2017). Bluetooth URL  
[https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc\\_id=429633&\\_ga=2.261454788.837700053.1545473305-1030374617.1545473305](https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=429633&_ga=2.261454788.837700053.1545473305-1030374617.1545473305) Access Date 10.05.2017
- Faragher, R., & Harle, R. (2015). Location fingerprinting with Bluetooth low energy beacons. *IEEE journal on Selected Areas in Communications*, 33(11), 2418-2428.
- Gogic, A., Mujcic, A., Ibric, S., & Suljanovic, N. (2016). Performance analysis of Bluetooth Low Energy mesh routing algorithm in case of disaster prediction. *Int. J. Comput. Electr. Autom. Control Inf. Eng.*, 3, 1075-1081.
- Gomez, C., Oller, J., & Paradells, J. (2012). Overview and evaluation of Bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology. *Sensors*, 12(9), 11734-11753.
- Heydon, R. (2013). *Bluetooth low energy: the developer's handbook* (Vol. 1). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Ko, J., Terzis, A., Dawson-Haggerty, S., Culler, D. E., Hui, J. W., & Levis, P. (2011). Connecting low-power and lossy networks to the internet. *IEEE Communications Magazine*, 49(4)
- Maharjan, B.K.; Witkowski, U.; Zandian, R. Tree Network Based on Bluetooth 4.0 for Wireless Sensor Network Applications. In *Proceedings of the 6th European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC)*, Milan, Italy, 11–12 September 2014.
- Martelli, F. (2014). *Bluetooth low energy*. University of Bologna, 25.
- Sirur, S.; Juturu, P.; Gupta, H.P. A Mesh Network for Mobile Devices Using Bluetooth Low Energy. In *Proceedings of the IEEE Sensors*, Busan, Korea, 1–4 November 2015.
- Zheng, J., Lee, M. J., & Anshel, M. (2006). Toward secure low rate wireless personal area networks. *IEEE Transactions on mobile computing*, 5(10), 1361-1373



## DALDIRMALI KAPLAMA SİSTEMİ İLE 2B MALZEMELERİN KAPLANMASI

Özge SAĞLAM\*

İzmir Ekonomi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Nanofilm,  
Nanolevha,  
Pullandırma,  
Tabaka-Tabaka Yöntemi,  
Daldırmalı Kaplama Sistemi.*

### Öz

İki boyutlu (2B) malzeme ailesinin bir üyesi olan inorganik nanolevhalar bir ya da birkaç atom kalınlığına sahip olup yığın katmanlı oksit malzemelerin kimyasal olarak pullandırılması ile elde edilmektedir. Bu çalışmada, nanolevhalarından meydana gelen nanofilmlerin tabaka-tabaka yöntemi ile üretilmesi için bir daldırmalı kaplama sistemi tasarlanarak üretilmiştir. Sistemin nanofilm üretimindeki performansını test etmek amacıyla  $Nb_6O_{17}$  nanolevhalar kullanılmıştır. Bunun için katmanlı  $K_4Nb_6O_{17} \cdot 3H_2O$  malzemesi pullandırılarak kalınlıkları yaklaşık 2 nm nanolevhalar elde edilmiştir. Daha sonra, negatif yüklü  $Nb_6O_{17}$  nanolevhalar ve pozitif yüklü polidialildimetilamonyum klorür (PDDA), otomatik daldırma sistemi kullanılarak kuartz alttaşlar üzerine dönüşümlü olarak yerleştirilmiştir.  $Nb_6O_{17}/PDDA$ 'in 5 kaplama döngüsüne sahip yüzey, atomik kuvvet mikroskobu ile taranarak alttaşın etkili şekilde kaplandığı görüntülenmiştir. Ayrıca, absorpsiyon spektrisi,  $Nb_6O_{17}/PDDA$ 'in çeşitli kaplama döngüleri için kaydedilmiştir. Daldırmalı kaplama sistemi ile elde edilen absorpsiyon değerindeki artış literatürde raporlanmış manuel kaplama sonucunda elde edilen absorpsiyon oranındaki artış ile kaliteli olarak benzer özellikler göstermiştir. Bu çalışmada önerilen düşük maliyetli ve laboratuvar ortamında geliştirilen sistemin de nanofilm kaplama araştırmalarında kullanılabileceği ortaya konmuştur.

## 2D MATERIALS COATED BY AUTOMATED DIPPING SYSTEM

### Keywords

*Nanofilm,  
Nanosheet,  
Exfoliation,  
Layer-by-Layer Method,  
Automated Dipping System.*

### Abstract

Inorganic nanosheets, members of the two-dimensional (2D) materials family, have one or several atomic thickness and they are obtained by chemical exfoliation of bulk layered oxide materials. In this study, automated dipping system was designed and manufactured to apply layer-by-layer method for fabrication of nanofilms composed by nanosheets. The performance of the system for nanofilm productions was determined using  $Nb_6O_{17}$  nanosheets. Therefore, layered inorganic  $K_4Nb_6O_{17} \cdot 3H_2O$  material was exfoliated to yield  $Nb_6O_{17}$  nanosheets having thickness around 2 nm. Negatively charged  $Nb_6O_{17}$  nanosheets and positively charged polydiallyldimethylammonium chloride (PDDA) were alternately deposited layer-by-layer method onto quartz substrates using automated dipping system. An atomic force microscopy (AFM) image visualized 5 deposition cycles of  $Nb_6O_{17}/PDDA$  pair with an effective coverage of the surface. Moreover, absorption spectra were recorded for various increasing deposition cycles of  $Nb_6O_{17}/PDDA$  pair. The increase in the absorbance value obtained with the system was qualitatively similar to the increase in the absorbance ratio obtained in the manual coating results reported in the literature. It is shown that the low cost coating system proposed in this study can be used in nanofilm fabrication.

### Alıntı / Cite

Sağlam, Ö., (2020). Daldırmalı Kaplama Sistemi ile 2B Malzemelerin Kaplanması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 20-32.

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

Ö. Sağlam, 0000-0002-5583-3662

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	14.09.2018
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	23.07.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	05.08.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: ozge.saglam@ieu.edu.tr, +90-232-488-8254

## 1. Giriş (Introduction)

İki boyutlu (2B) malzemeler silikon tabanlı teknolojilere alternatif olarak araştırılmakta olup 2004 yılında grafenin izolasyonu ile 2B malzemeler üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Karbonun iki boyutlu bal peteği örgülü yapısına sahip grafen (Novoselov vd., 2004) , grafitin mekanik olarak ayrılması sonucunda elde edilmektedir. Grafenle beraber 2B malzemelere olan ilgi artmış ve değişik yapıdaki 2B malzemeler de yoğun olarak çalışılmaya başlanmıştır. Bu kapsamda araştırılan inorganik oksit nanolevhalar, katmanlı oksit malzemelerden üretilmektedir. Grafenden farklı şekilde, inorganik oksit nanolevhalar mekanik-pullandırma ile değil, katmanlı oksit malzemelerin kimyasal olarak pullandırılması ile 2B haline getirilir. Ayrıca, bu malzemeler pullandırıldıkları katmanlı yapının kristal özelliklerine göre magneto-optik (Osada vd., 2011), optoelektronik (Akatsuka vd., 2012), fotokatalitik (Izawa vd., 2006), yüksek-k dielektrik (Akatsuka vd., 2009), elektrokimyasal (Altuntasoglu vd., 2008), ve fotolüminesans (Ida vd., 2007) özellikler gösterir. Son yıllarda oksit nanolevhaların kullanım alanını genişleterek nanolevhalarından meydana gelen süperkafes yapılar da çalışılmaya başlanmıştır. Bu kapsamda ana katmanlı yapının kompozisyonu değiştirilerek elde edilen değişik tipte nanolevhalar birleştirilerek aşağıdan-yukarıya yöntemiyle nanolevhaların özelliklerini taşıyan ya da nanolevhaların etkileşimiyle yeni özellikler kazanan nanofilm üretimi (Li vd., 2016) yapılmaktadır. İnorganik nanolevhalarla yapılan 'beher epitaksisi' olarak da adlandırılan ıslak kimya yaklaşımları, demet epitaksisi ile kıyaslandığında yöntemsel olarak çok basit, ucuz ve çevreci olup araştırmacılara da atomik düzeyde çalışabilme imkanı sağlamaktadır (Uppuluri vd., 2018). Ayrıca nanofilm üretiminde yapı taşı olarak kullanılan nanolevhalar, ihtiyaç halinde metal komplekslerle, poliyonlarla ve mevcut demet epitaksisi ile birleştirilmesi güç malzemelerle bir araya gelebilir (Keller vd., 1994). Böylece inorganik nanolevhaların birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit malzeme üretimi ve süper kafes tipli yapıların geliştirilmesi ve nanolevhalarından aygıt yapımı mümkün olmaktadır (Cai vd., 2014).

Nanolevhalarından oluşan nanofilmler, yukarıda bahsedilen beher epitaksisi olarak bilinen tabaka-tabaka ve flokülasyon yöntemleri ile üretilmektedir (Ma vd. 2010). Özellikle, elektrostatik ardışık adsorpsiyon yöntemi olan tabaka-tabaka yöntemi bu amaç için çok etkilidir (Wang vd., 2005). Tabaka-tabaka yöntemi kullanılarak nanometre kalınlıkta kompozit filmler üretmek mümkündür (Hata vd., 2007).

Tabaka-tabaka yöntemi ile üretilen nanofilmlerin kaliteleri nanolevhaların kristal yapısına ve yük yoğunluğuna bağlıdır (Nguyen vd. 2016). Ancak işlem manuel yapıldığında, kişiye ve zamana bağlı olarak oluşacak farklılıklar ve insana bağlı hatalar kaplama işleminin bir standarttan uzaklaştırmaktadır. Ayrıca nanofilm kalitesi kullanılan nanolevhaların yanal alanına ve elektrostatik yüküne bağlıdır. Dolayısıyla eğer yeni tipte nanofilm üretilecekse filmin kalitesini arttırmak adına daldırma, yıkama ve kurutma süreleri gibi parametrelerin sistematik olarak değiştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada nanofilm üretiminde kullanılan tabaka-tabaka yöntemi için otomatik daldırma kaplama sistemi tasarlanıp üretilmiştir. Sistem ile araştırmacılar, parametre değerlerini manuel kaplamaya göre daha kontrollü değiştirerek, üretilen nanofilm kalitesinde kararlılık ve sürdürülebilirlik sağlayabilecektir. Bu sistem ile negatif yüklü Nb<sub>6</sub>O<sub>17</sub> nanolevhalar ve pozitif yüklü PDDA kullanılarak 1, 3 ve 5 katmanlı filmler elde edilmiş ve sistemin başarısı test edilmiştir. Geliştirilen sistem piyasadaki muadillerine göre düşük bütçeli ve kolay imal edilmiştir. Bunun yanında sistem, muadilleriyle film kalitesi olarak benzer nanofilm üretimi yapmakta olup araştırmacıların sistemi kendileri de üretebilmesi için sistemin bileşenleri detaylı olarak çalışmada sunulmuştur.

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Son yıllarda, fonksiyonel nanofilmlerin aşağıdan-yukarıya yüzey modifikasyon yöntemleri ile tasarlanması ve üretilmesi ve böylece istenen özelliklere sahip yeni tip nano yapıların oluşturulması araştırmacılar arasında sıklıkla kullanılan bir stratejidir. Aşağıdan-yukarıya nanofabrikasyon yöntemleri arasında en bilinenleri, Langmuir-Blodgett (LB) (Wang vd., 2014) ve kendiliğinden toplanan monotabakalardır (Kondo vd., 2013). Her iki yöntemle de sık konumlu ve iyi organize edilmiş tekli tabakalardan oluşan nanofilmler üretilse de bu yöntemlerin bir takım dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, LB yöntemi ile nano yapıların üretim süreci uzundur ve yöntemin kullanılabilmesi için pahalı ve özelleşmiş ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntem ile düzenli mono tabakalardan çok katmanlı nanofilmler üretilse de eğer katman ile altta arasında güçlü bir moleküler etkileşim olmazsa, moleküllerin hava-su ara yüzeyinden alttaş transferi zorlaşır ve bu durum nanofilmlerin mekanik olarak kararsızlığına yol açar. Öte yandan, kendiliğinden toplanan mono tabakaların en belirgin dezavantajları, ambiyant koşullar altında filmlerin kararsızlığı ve sağlamlıklarında karşılaşılan sorunlardır. Bunun yanında, filmlerin tek tabakalı yapıları nedeniyle bazı moleküller, alttaş bağlanmak için ekstra, spesifik bir bileşiğe ihtiyaç duymakta bu da bu yöntemle çok katmanlı nanofilm üretimini zorlaştırmaktadır. Bahsedilen yöntemlerin yanında, fonksiyonel ince filmler üretmek için darbeli lazer biriktirme (Seo vd., 2018), kimyasal buhar biriktirme (Wang., 2018) gibi yöntemler de sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerin de yüksek ekipman maliyetleri ile kullanılan nanomalzemelerin ve bu nanomalzemelerin biriktirildiği yüzeylerin çeşitliliğinde sınırlamalar bulunmaktadır. Bu nedenle, neredeyse her yüzey üzerinde sağlam ve çok tabakalı nanofilmler üretebilen ve bunu



filmlerde kullanılan nanomalzemelerin çeşitliliğini sınırlandırmadan yapan, basit, ucuz ve esnek bir yöntem olarak tabaka-tabaka yöntemi bahsedilen yöntemler arasında öne çıkmaktadır.

Tabaka-tabaka yöntemi ilk olarak 1960' larda karşıt yüklü inorganik mikropartiküllerin ince filmlerinin imalatında kullanılmıştır (İler vd., 1966). Bu yöntem daha sonra, geniş bir polielektrolit yelpazesine uygulanmıştır (Decher ve Hong, 1991). Oksit nanolevhalarla uygulamak için de karşıt yüklü polidialildimetilamonyum klorür (PDDA) ve polietilenimin gibi polikasyonlar kullanılmıştır (Sasaki vd., 2001). Böylece alttaşı oksit nanolevhaların koloidal süspansiyonuna ve uygun polielektrolitlerin sulu bir solüsyonuna daldırarak nanometre kalınlıkta kompozit nanofilmler elde edilmiştir. Tabaka-tabaka yöntemiyle nanolevhaların tipini, katman sayısını, katman sıralamasının ardışık birikimini değiştirerek süperkafes yapılar oluşturmak oldukça pratik olup yukarıda bahsedilen çalışmalarda da gösterildiği gibi bu yöntem ile nanolevhalarından nanofilmler üretilebilmektedir. Tabaka-tabaka yöntemi kullanılarak nanofilm üretildiğinde katman sayısındaki artış, filmlerin UV-görünür bölge absorpsiyonlarındaki ve XRD desenlerinin şiddetinde artışa yol açmakta ve böylece nanofilm üretiminin başarısı test edilebilmektedir. Örneğin, Sasaki vd. tarafından yapılan çalışmada pozitif yüklü PDDA ile negatif yüklü ~1.2 nm kalınlığa sahip titanyum oksit nanolevhalar [ $Ti_{1.8}O_{2.46}$  ( $\delta = 0.0875$ )] tabaka-tabaka yöntemi ile birleştirilerek farklı katmanlara sahip nanofilmler üretilmiştir. Nanofilmlere eklenen her katmandan sonra nanofilmin UV-görünür bölge absorpsiyon spektrumunda titanyum oksit nanolevha tabanlı olarak 265 nm' de artış meydana gelmiştir. Bu durum, farklı konsantrasyonlara sahip titanyum oksit nanolevha çözeltileri kullanılarak da tekrarlanmıştır. Bir başka çalışmada ise PDDA polikasyonları ile mangan oksit (MnO) nanolevhaları tabaka-tabaka yöntemi birleştirilerek nanofilmler üretilmiştir (Wang vd., 2003). Üretilen filmlerde, nanolevhaların katman sayısına bağlı olarak filmlerin UV-görünür bölge absorpsiyon spektrumunda 380 nm' de lineer bir artış meydana gelmiştir. Filmlerin X-ışını kırınım desenlerinde konumlanmış  $2\theta = 9.6^\circ$  Bragg pikinin şiddetinde de PDDA/MnO filminin biriktirme sayısı ile doğru orantılı bir artış görülmüştür.

Bununla birlikte oksit nanolevhalarından oluşan nanofilmin yapısı yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu görüntüleri ile de gösterilebilmektedir (Li vd., 2010). Ayrıca nanolevhalar ile grafen (Yang vd., 2012), fonksiyonel moleküller (Altuntasoglu vd., 2008), metal nanopartiküller (İda vd., 2006), nanotüpler (Ding vd., 2011) birleşmesi ile nanofilmlerin farklı versiyonları tabaka-tabaka yöntemi sayesinde üretilmektedir. Süper kafes yapılar ile tek bir malzemeyle elde edilemeyen birçok fonksiyon, nanofilm yapısında yapılacak dikkatli bir tasarım ile elde edilmiştir. Örneğin, yapılan bir çalışmada tabaka-tabaka yöntemi kullanılarak ferromanyetik nanolevhalar olan  $Ti_{0.8}Co_{0.2}O_2$  ve  $Ti_{0.6}Fe_{0.4}O_2$  oluşturdukları süperkafes yapılarda ise nanolevhalar arasındaki d-d geçişleri ( $Co^{2+}-Fe^{3+}$ ) sayesinde oluşan manyetik-optik yanıt  $\sim 3 \times 10^5$  deg  $cm^{-1}$  seviyesine ulaşmıştır (Osada vd., 2011). Başka bir çalışmada, metalik ve dielektrik nanolevhalarından oluşan filmler sandviç yapıya benzer şekilde sıralı olarak tabaka-tabaka yöntemi ile üst üste konulmuştur. Çalışmanın amacı her tabakası nanolevha bazlı ultra ince kapasitörlerin üretimi için ilk uygulamanın geliştirilmesidir. Bu nedenle,  $Ru_{0.95}O_2 / Ca_2Nb_3O_{10} / Ru_{0.95}O_2$  nanolevhalar kullanılarak yapılan kapasitör uygulamasında dielektrik tabaka olan  $Ca_2Nb_3O_{10}$  nanolevhası  $SrRuO_3$  alttaş üzerine Langmuir Blodgett tekniği ile kaplanmıştır (Wang vd., 2014). 28 nm gibi bir kalınlığa sahip olmasına rağmen, sistem aslında ultra ince kapasitör olarak çalışmış ve yüksek kapasitans yoğunluğuna ( $\sim 30 \mu F/cm^2$ ) ulaşmıştır. Elde edilen kapasitans yoğunluğu, ticari  $BaTiO_3$  tabanlı kapasitörlere ( $\sim 20 \mu F/cm^2-5 \times 10^4 nm$ ) oranla yaklaşık 2000 kat daha yüksektir, son teknolojiye sahip  $HfO_2$  tabanlı ultra ince kapasitörlerin ( $\sim 0.9 \mu F/cm^2-10 nm$ ) yaklaşık 10 katına sahiptir. Diğer bir çalışma tabaka-tabaka yöntemi ile fotokatalitik oksidatif  $TiNbO_5$ ,  $Ti_2NbO_7$ ,  $Ti_5NbO_{14}$  ve  $Nb_3O_8$  nanolevhaların oluşturdukları nanofilmlerde foto-indüklenmiş hidrofilik dönüşüm özelliği gözlemlenmiştir. En yüksek dönüşüm aktivitesine sahip olan  $Nb_3O_8$  pullardaki aktivite, katmanlı yapısına göre yaklaşık 60 misli daha büyüktür (Shibata vd., 2011). Bu özellikleri bu malzemelerin, kendi kendine temizleme ve sis giderici fotokatalitik kaplama uygulama alanlarında kullanılmasına yol açmıştır.

Yapılan bilimsel literatür taramasında anlaşılmıştır ki literatürde nanofilm fabrikasyonunda kullanılan tabaka-tabaka yöntemi için özelleşmiş daldırma kaplama sisteminin üretimini adım adım ortaya koyan herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sistem, nanofilmlerin üretiminde araştırmacıya kolaylık sağlamakta olup muadillerine göre maliyeti oldukça düşüktür. Sistem, azot gazı ile entegre olup gazın alttaşı kurutma süresi, akış hızı ve gaz nozülünün alttaşa olan mesafesi ayarlanabilmektedir. Ayrıca nanofilm üretimindeki reçeteler kayıt altında tutularak kaplama anlık ve grafiksel olarak da takip edilebilmektedir. Bunun yanında nanolevhalar, koloidal olarak çözeltilde buldukları için nanolevhaların çökmemesi için sistemin çalkalama özelliği bulunmaktadır. Böylece nanolevha çözeltisi değiştirilmeden uzun süre nanofilm üretiminde kullanılabilir. Bu avantajları sayesinde araştırmacıya kolaylık sağlayan sistemin bileşenleri detaylı olarak sunulan çalışmada verilerek sistemin nanofilm üretimindeki performansını test etmek için de farklı katman sayılarına sahip nanofilmler üretilerek karakterize edilmiştir.

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

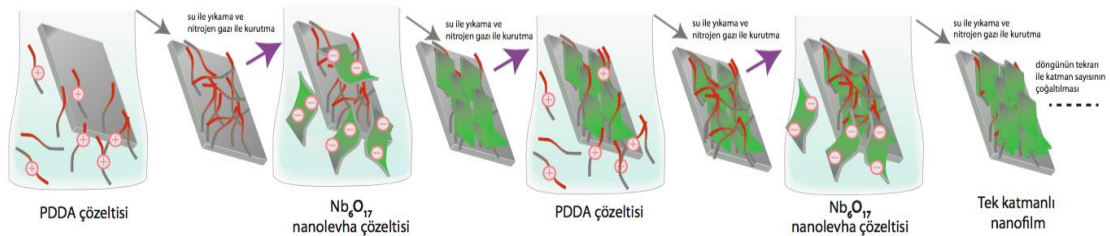
#### 3.1. Nanolevha Sentezi (Synthesis of Nanosheets)

Katmanlı malzeme  $K_4Nb_6O_{17} \cdot 3H_2O$  klasik katı hal yöntemi ile üretildi. Bunun için  $K_2CO_3$  (Sigma-Aldrich-209619, %99.99) ve  $Nb_2O_5$  (Sigma-Aldrich-203920, %99.99) stokiyometrik oranlarda karıştırılarak 1423 K' de 12 saat boyunca kalsine edildi. Malzeme sentezlendikten sonra tabakalarına ayırmak için kullanılan pullandırma yönteminden önce, katmanlı yapı proton formuna dönüştürüldü. Protonasyon işlemi için, sentezlenen oksitli toz malzemeden 0.5 g alınarak 50 ml 3M HCl (Isolab Chemicals-932.106, %37 wt.) çözeltisi ile 5 gün boyunca oda sıcaklığında çalkalanması (Çalkalayıcı: IKA KS 4000 IC Control) sağlandı. Protonasyon işleminin verimini arttırmak için bu süre boyunca asit çözeltisi üç kez değiştirildi. Pullandırma işlemi için 0.5 g iyon değiştirilmiş katmanlı malzeme ile 50 mL 0.1 M tetrabutylamonyum (TBA, 86854 Supelco, %40 wt.) çözeltisi oda sıcaklığında beş gün çalkalandı. Reaksiyonun gerçekleşmesinden sonra çözelti 3000 rpm ile 30 dakika santrifüj (Santrifüj cihazı: Hanil Science Industrial Combi 514R) edildi. Üstte kalan süzöntü olan  $Nb_6O_{17}$  (NbO) nanolevhaları içeren kolloidal kısım, nanofilm üretiminde kullanılmak üzere çöken kısımdan ayrıldı.

#### 3.2. Nanofilm Üretimi (Nanofabrication of Nanofilms)

Nanofilmlerin hazırlanması için kuartz alttaşlar 1cm x 2 cm ebatlarında kesildi. Kesilen alttaşlar 10 ml' lik sırasıyla aseton (Sigma-Aldrich-24201, >%99.99) ve isopropanol (Sigma-Aldrich-24137, ≥%99.5) ile 20' şer dakika ultrasonik banyoda temizlendi ve azot gazı ile kurutuldu. Alttaşlar daha sonra daldırılmalı kaplama sistemine alındı. Burada kaplama yapılan alttaşın yüzey alanı ~1 cm<sup>2</sup> olup alttaş önce % 5 wt' lik PDDA çözeltisine (Sigma-Aldrich-409014, %20 wt.) daldırılarak 5 dakika çözeltinin içinde bekletildi. Fazla miktardaki PDDA, alttaşın saf suya daldırılması ile giderildi ve alttaş saf azot gazıyla kurutuldu. Son olarak 10 dakika nanolevha çözeltisine daldırılıp saf su ile yıkanarak tekrar azot gazı ile kurutuldu. Böylece, tek katmanlı nanofilm elde edildi. Bu işlemler dönüşümlü olarak tekrar edilerek 5 katmana kadar nanofilm elde edildi. Nanofilm tabaka-tabaka yöntemiyle üretim basamakları Şekil 1' deki gibidir.

Daha önce NbO nanolevhası kullanılarak manuel kaplama ile nanofilm üretilmiştir (İda vd., 2006). İda vd. tarafından yapılan çalışmada alttaş 10 dk. boyunca nanolevha çözeltisine daldırılmış ve sonrasında saf suya bir kez daldırılarak kaplama yapılmıştır. Yine aynı çalışmada, oluşturulan nanofilmlerin absorpsiyonunda, kaplama sayısına göre artış görülmüş ve nanofilm oluşumu ayrıca atomik kuvvet mikroskobu ile de gözlemlenmiştir. Bu sebeple, sunulan çalışmada aynı parametreler kullanılmıştır. Kurutma süresi nitrojen gazının çıkış hızına ve nozül ile alttaş arasındaki mesafeye bağlı olup bu çalışmada kurutma işlemi, alttaş üzerinde çözelti kalmayınca kadar 30 sn. boyunca sürdürülmüştür. Nozül ile alttaş arasındaki mesafe ise 1 cm olacak şekilde ayarlanarak gazın çıkış hızı ~0.84 x 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/sn.' ye getirilerek kurutma işlemi yapılmıştır. Kurutma işlemi üfleme şeklinde yapıldığı için sistem ile farklı atmosferik (nem, sıcaklık vb.) koşullarda çalışılmamaktadır.



Şekil 1. Nanofilmin tabaka-tabaka yöntemiyle üretilmesi (Fabrication of nanofilms by layer-by-layer method)

#### 3.3 Malzemelerin Karakterizasyonu (Characterization of Materials)

Katmanlı malzemenin kristal yapısı, X-ışını difraktometresi ile analizi yapıldı. Bunun için Cu K $\alpha$  radyasyonlu Philips X'Pert Pro X-Ray difraktometresi ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) kullanıldı. Nanolevhaların tabaka kalınlıkları ve üretilen filmlerin yüzey yapısı Hitachi 5100N atomik kuvvet mikroskobu (AKM) ile tespit edildi. Nanofilmlerin katman sayısına bağlı absorpsiyon değerleri, Perkin Elmer Lambda 750 UV/vis/NIR spektrofotometre ile ölçüldü.

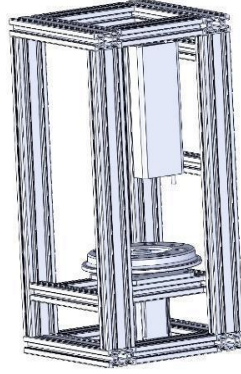
#### 3.4 Daldırılmalı Kaplama Sistemi Tasarımı ve Üretimi (Design and Manufacturing of Automated Dipping System)

Sistem tasarlanırken ilk olarak manuel kaplama sırasındaki deney adımları, elektromekanik olarak taklit edilerek

sistem bileşenleri ortaya çıkarıldı. Doğrusal aktüatör, alttaşı dikey pozisyonda ve aynı hızda nanolevha çözeltisine daldırması için kullanıldı. Alttaşın kaplama basamakları arasında kurutulmasını sağlamak için nitrojen gazını püskürten bir nozül, kurutma mesafesi, püskürtme hızı ve süresi ayarlanabilir şekilde sisteme entegre edildi. Böylece kaplama işlemi kullanıcıdan bağımsız hale gelerek işlemden bir standardizasyon ve tekrarlanabilirlik sağlandı. Farklı tipte nanolevha ve polimer çözeltileri kullanılabilmesi için sekiz gözlü bir taret geliştirildi. Ayrıca araştırmacının deney adımlarını kontrol etmesi için anlık olarak bilgilendirildiği reçete bazlı arayüz tasarlandı. Böylece, manuel kaplama sırasında araştırmacı tarafından takip edilen deney basamakları, bilgisayar destekli hale getirildi.

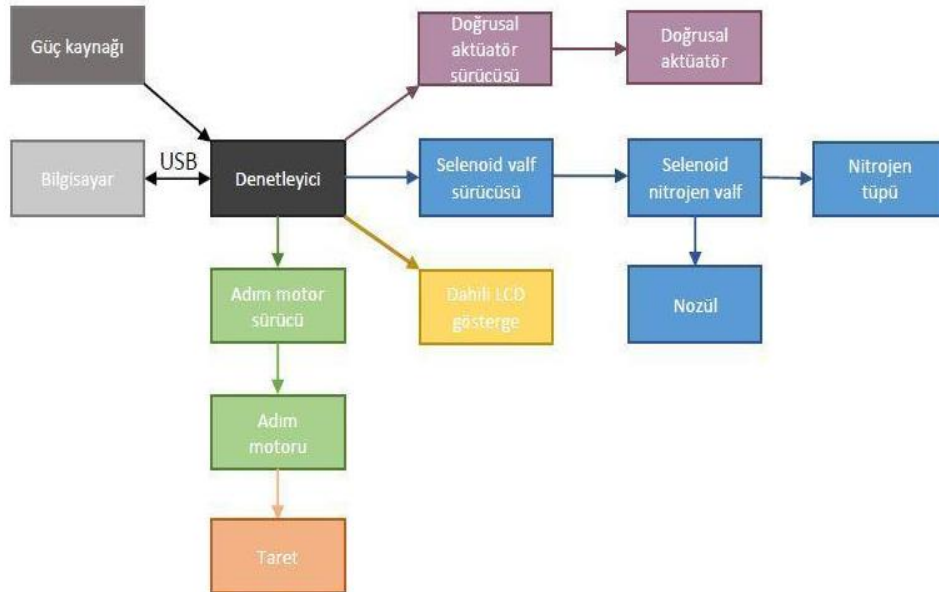
### 3.4.1 Mekanik Tasarım (Mechanical Design)

Solidworks programı aracılığı ile sistemin katı modeli oluşturuldu (Bkz. Şekil 2). Ardından oluşturulan katı modeller üzerinden teknik resimler elde edildi. Bu teknik resimler aracılığı ile CNC talaşlı imalat metotları kullanılarak taret üretildi. Sigma profiller kullanılarak taşıyıcı iskelet oluşturuldu. SW Simulation programı ile oluşturulan katı modellere uyularak sigma profiller ve taret birbirine monte edildi.



Şekil 2. Sistemin katı hal modeli (Solid-state model of the system)

Sistemin bileşenleri Şekil 3’de şematik olarak gösterilmekte olup genel görüntüsü Şekil 4’deki gibidir.



Şekil 3. Daldırma sisteminin bileşenleri (Components of the automated dipping system)



### 3.4.3.4 Adım Motoru Sürücüsü (Stepper Motor Controller)

Adım motorunu denetleyiciden gelen denetim sinyalleri aracılığıyla kontrol eden bileşendir.

### 3.4.3.5 Adım Motoru (Stepper Motor)

Çözeltilerin yerleştirildiği dairesel düzenek olan taret yazılım denetimde açılabilir olarak pozisyonlayan bileşendir.

### 3.4.3.6 Doğrusal Aktüatör Sürücüsü (Linear Actuator Controller)

Denetleyiciden gelen denetim sinyallerini, altta taşıyıcı alt sisteme gerekli güçte ileten bileşendir.

### 3.4.3.7 Doğrusal Aktüatör (Linear Actuator)

Altta taşıyan doğrusal aktüatör sürücüsü tarafından kontrol edilen altta dikey olarak pozisyonlayan bileşendir.

### 3.4.3.8 Dahili LCD Gösterge (Inner LCD Display)

Araştırmacının anlık sistem durumu hakkında bilgilendirildiği dahili bir gösterge ekranıdır. 4 satır ve her satır başına 20 karakterlik bir kapasiteye sahiptir.

### 3.4.3.9 Güç Kaynağı (Power Supply)

Şebeke enerjisini denetleyici dahil tüm bileşenlerin ihtiyaç duyduğu voltaj ve akım değerlerinde sağlayan bir bileşendir. Güç kaynağının teknik özellikleri, toplam kurulu güç tüketimi olan 25 W' tan % 20 güvenlik payı bırakılarak belirlenmiştir.

### 3.4.3.10 USB Arayüz (USB Interface)

Denetleyici ile bilgisayar arasında veri alışverişini sağlayan USB 2.0 standardında bir devre bileşendir.

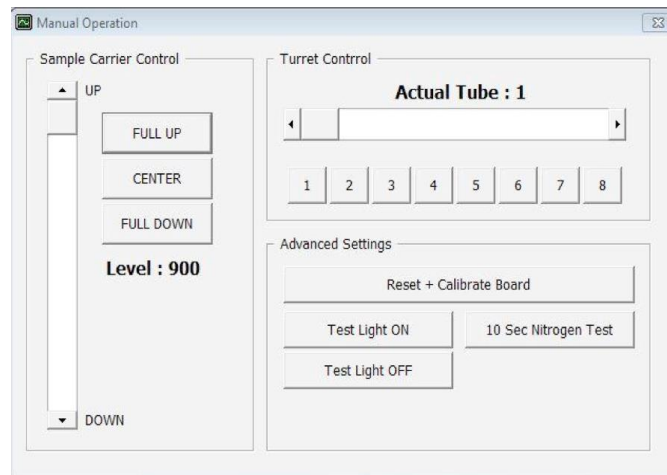
Tesisat bağlantıları dışı bağlantılar ve otomatik bağlantı elemanları ile yapılmıştır.

## 3.4.4 Bilgisayar Yazılımı (Software)

Hazır bir yazılım yerine sistem için özel olarak geliştirilen yazılım, Visual Basic kullanılarak hazırlanmıştır. Manuel ve otomatik operasyon olarak yazılım iki ana kısımdan oluşmaktadır.

### 3.4.4.1 Manuel kontrol (Manual Control)

Bu kısımda sistemin bütün fonksiyonları manuel olarak çalıştırılıp durdurulabilir. Temel amacı test, ilk çalıştırma ve fonksiyonların ayarlanması için olan bu özellikler kullanıcı tarafından istenildiğinde rutin işlemler için kullanılabilir.

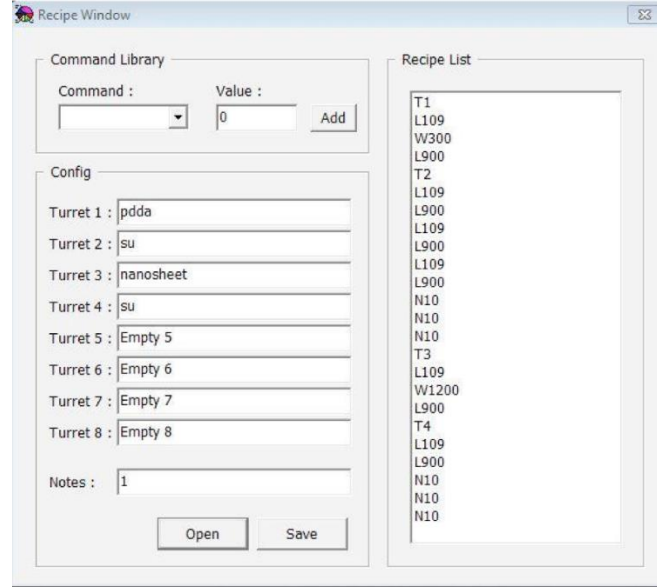


Şekil 6. Yazılımda manuel kontrolün gerçekleştiği pencere (Software control window for manual operation)



### 3.4.4.2 Otomatik Kontrol (Automatic Control)

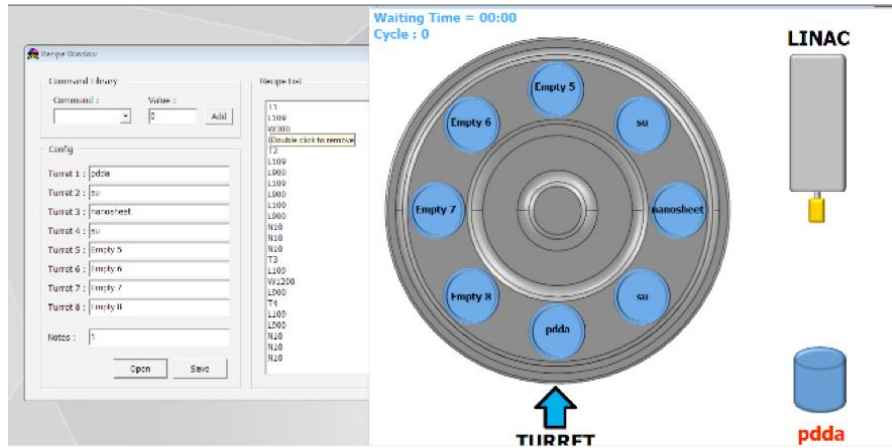
Bu kısımda reçete bazlı ardışık işlemler sırası temeli ile hazırlanmış otomatik kumanda reçete ve izleme penceresi olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Reçete penceresinde çözeltiler isimlendirilir ve her bir pozisyona bir çözelti atanır. Komut listesinden seçilecek komutlar ve bu komutlara ait ilgili parametreler reçete listesine eklenir. İstenildiği takdirde bu veriler kaydedilip geri çağrılabilir.



Şekil 7. Otomatik kontrolün gerçekleştiği ve reçetenin girildiği pencere (Software control window for automatic operation and recipe configuration)

### 3.4.4.3 İzleme Penceresi (Monitoring Screen)

Taretin ve doğrusal aktüatörün gerçek zamanlı grafiksel görselleştirilmesi üzerine sistemin anlık durumu takip edilebilmektedir.



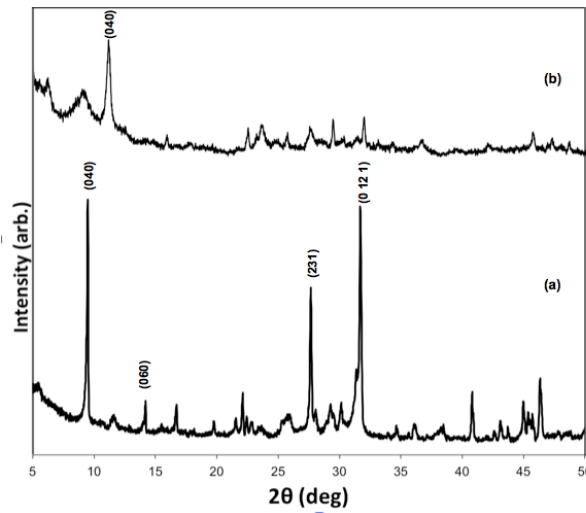
Şekil 8. Taretin ve doğrusal aktüatörün anlık olarak takip edildiği pencere (Software control window for instant tracking of the turret and the linear actuator)

## 4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Katmanlı oksit malzemelerde ara katmanlardaki yük yoğunluğu fazla olup bu da malzemelerin kimyasal olarak pullandırılmasını güçleştirmektedir. Ancak katmanlı oksit malzemeler arasındaki iyonlar kolaylıkla değiştirilebilmektedir. Böylece malzemeler yüksek kalitede kimyasal olarak pullandırılır. Pullandırma işlemi sırasıyla iyon değişimi, ozmotik şişme ve pullandırmadan oluşan çok aşamalı kimyasal bir süreçtir. TBA gibi organo-amonyum iyonlarının eklenmesi ile tetiklenen, hidrasyona bağlı ozmotik şişme, nanolevhaların üretimindeki en önemli aşamadır. Yapılan araştırmalara göre, ara katmanın normal şartlardaki mesafesi yaklaşık

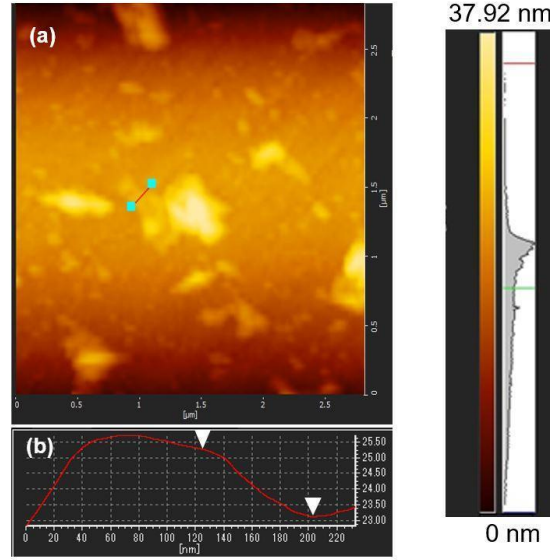
100 katı kadar şişebilmektedir (Ma vd., 2006). Ozmotik olarak şişmiş katmanlı yapı bir amin çözeltisi ile karıştırılırsa katmanları birbirinden ayrılarak nanolevhalar üretilir. İyon değişimi sonrası ozmotik şişme ve dolayısıyla kimyasal pullandırma bir çok faktöre bağlıdır. Bunların başında konak tabakanın kompozisyonu, yük yoğunluğu, pullandırmada kullanılan çözgen, çözgenin polaritesi, büyüklüğü ve dielektrik özellikleri ve tabakalar arası iyonun çeşidi gelmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada  $K_4Nb_6O_{17} \cdot 3H_2O$  önce HCl ile ara katmanlar protone edilmiş ve katmanların ozmotik olarak şişmesi sağlanarak bir amonyum çözeltisi olan TBA çözeltisi kullanılarak pullandırılmıştır.

Şekil 9 (a)' da  $K_4Nb_6O_{17} \cdot 3H_2O$  X-ışını kırınım deseni gösterilmektedir. Madaro vd. tarafından üretilen  $K_4Nb_6O_{17} \cdot 3H_2O$  kristal malzemesinin X-ışını kırınım deseninde en yoğun kırınım çizgisi (040) pikine ait olup  $9.5 \text{ \AA}$  değerine karşılık gelmektedir (Madaro vd., 2011). Şekil 9' da verilen X-ışını kırınım desenindeki (040) pikinin d-değeri ise  $9.35 \text{ \AA}$  değerine tekabül etmekte olup bu da katmanlı malzemenin plakaların büyümesinin Madaro vd. ile uyumlu olarak b eksenine dik olarak oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca katmanlı malzemenin kristal yapısının tepe pozisyonları ortorombik  $K_4Nb_6O_{17} \cdot 3H_2O$  fazının XRD desenleriyle uyum içinde olup malzemenin JCPDS kart numarası 21-1297' dir. Şekil 9 (b)'de ise  $K_4Nb_6O_{17} \cdot 3H_2O$  katmanlı malzemenin protonasyon değişimi reaksiyonundan sonra X-ışını kırınım deseni görülmektedir. Katmanlı malzemenin b eksenindeki büyümesini gösteren bir kısım (040) pikinde sağa doğru kayma meydana gelmiştir. Bu da katmanlar arası mesafenin azalarak malzemenin kısmi şekilde protone olduğunu göstermektedir.

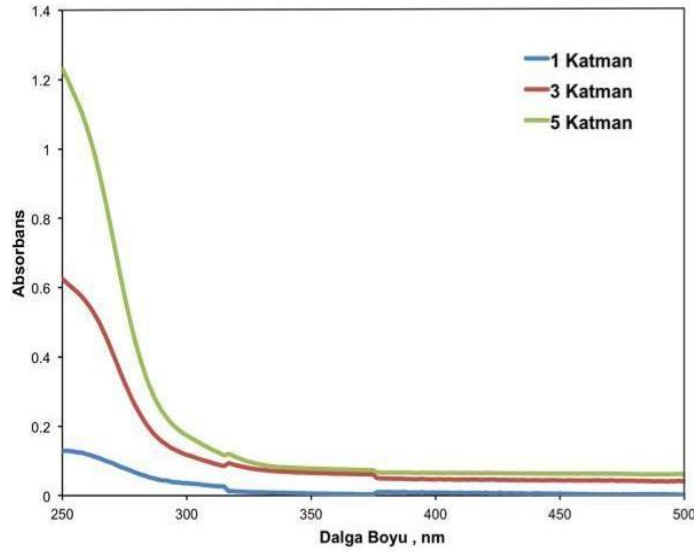


**Şekil 9.** (a) Katmanlı  $K_4Nb_6O_{17} \cdot 3H_2O$  'nin X-ışını kırınım deseni (b) katmanlı malzemenin proton değişimi sonrası X-ışını kırınım deseni ((a) X-ray diffraction pattern of the layered  $K_4Nb_6O_{17} \cdot 3H_2O$  material (b) X-ray diffraction pattern of protonated layered material

Şekil 10 (a) 'da verilen AKM görüntüsü, katmanların birbirinden ayrılarak nanolevhaları oluşturduğunu göstermektedir. Pullandırılmış tabakaların yükseklik analizine bakıldığında nanolevhaların en düşük kalınlıkları yaklaşık  $2 \text{ nm}$  olarak saptanmıştır. Tekli NbO nanolevhasının kalınlığının  $1 \text{ nm}$  olup (Izawa vd. 2006) çözeltideki nanolevhaların ise en az iki katmandan itibaren oluştuğu anlaşılmaktadır. Ancak bu durum nanolevhaların negatif yüklü olmasını etkilemediği için pozitif yüklü PDDA çözeltisi kullanılarak nanofilmler oluşturulmuştur. Böylece daldırma kaplama sisteminin nanofilm üretimindeki kullanılabilirliği test edilmiştir. Aslında kaplama sistemi manuel yöntemle bir farklılık göstermese de kişiye bağlı oluşabilecek farklılardan ve yapılabilecek olası hatalardan üretimi koruyarak süreci standardize etmektedir. Sistem, daldırma açısından, daldırma süresinde, kurutma mesafesi ve süresinde kullanıcıya bağlı farklar ortaya koymaz. Bu da nanofilm üretiminin otomatize edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 10. Nanolevhanın AKM görüntüsü ve nanolevhanın yükseklik profili (AFM image and height profile of the nanosheets)



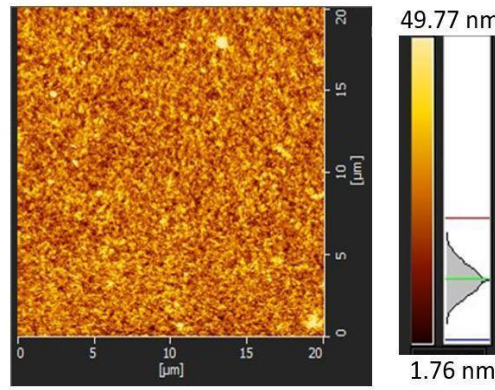
Şekil 11. Tabaka-tabaka yöntemi üretilen nanofilmlerin UV-vis absorpsiyon spektrumu (UV-vis absorption spectra of the nanofilms fabricated by layer-by-layer method)

Nanofilmler, daldırmalı kaplama sistemi kullanılarak tabaka-tabaka yöntemi ile hazırlandı. Negatif yüklü NbO nanolevhalar ve pozitif yüklü PDDA çözeltisi kuartz alttaş üzerinde sıralı adsorpsiyon ile yerleştirildi. Böylece 1, 3 ve 5 katmanlı filmler üretilerek UV-vis spektrumlarına bakıldı. Şekil 11' de görülen 250-300 nm aralığında absorbans artışı nanolevhaların absorbansından dolayı (İda vd., 2006) meydana gelmektedir. İda vd. tarafından yapılan bu çalışmada, NbO nanolevhalarının ve  $Tb^{3+}$  iyonlarının manuel olarak tabaka-tabaka yöntemi ile bir araya getirilmesi ile nanofilm üretilmiştir. İlgili çalışmada kullanılan NbO nanolevhaların kalınlıkları AKM ile 1.03 nm olarak belirlenmiştir. Üretilen nanofilmin 1. katmanında elde edilen absorbans değeri 250 nm dalga boyunda ~ 0.28' e ulaşırken 3. katmanında ~ 0.32 ve 5. katmanda ~0.35' e çıktığı görülmüştür. Kaplama sistemi ile üretilen nanofilmdeki absorbans değerleri ise Tablo 1' de İda vd. çalışmasında elde edilen değerler ile karşılaştırılabilirliği için Şekil 11' den alınarak özetlenmiştir. İki kaplama arasında absorbans değerlerinde farklılıklar olduğu görülmüştür. İda vd. tarafından kullanılan nanolevha çözeltisinin kalınlıkları 1.03 nm olan tekli nanolevhalarından oluşmaktadır. Kaplama sistemi ile üretilen nanofilmde ise en az iki katmandan oluşan nanolevhalar içeren çözelti kullanılmıştır. (bkz. Şekil 10). Bu da iki kaplama arasında absorbans değerlerinde farklılıklara neden olmuştur. Ancak, UV-vis spektrumlarındaki absorpsiyon yoğunluğu, tabaka sayısındaki artış ile orantılı olup PDDA-NbO nanofilmlerin tabaka-tabaka yöntemi kullanılarak daldırmalı kaplama sistemi ile de üretililebileceğini göstermiştir. Bu sonuç ayrıca manuel olarak üretilen nanofilmlerde katman sayısına bağlı absorbans oranındaki artışın, farklı boyutlarda nanolevhalar kullanılmasına rağmen sürece getirilen standardizasyon sayesinde kaplama sistemi ile de tekrarlanabilir olduğunu göstermiştir.

**Tablo 1.** Manuel kaplama (Ida vd. 2006) ve mevcut çalışmadaki kaplama sistemi ile elde edilen farklı katman sayılarına bağlı absorbands değerleri (Absorbance values of LBL nanofilms with 1, 3, 5 layers coated by manual operation (Ida et al. 2006) and the automated dipping system)

Nanofilmdeki Katman Sayısı	Absorbans Değeri (Ida vd. 2006-Manuel Kaplama)	Absorbans Değeri (Daldırmalı Kaplama Sistemi)
1	0.28	0.13
3	0.32	0.63
5	0.35	1.23

Nanolevhaların farklı boyutlara yani farklı yanal alana ve kalınlığa sahip olmalarının nedenleri kısacak anlatılacak olunursa: Nanolevhalar kimyasal pullandırma ile üretilirken TBA molekülleri tabakalar arasına girerek ara katmanda ozmotik bir şişmeye neden olur. Mekanik çalkalamanın etkisi ile katmanlar birbirlerinden kontrolsüz bir şekilde ayrılır ve kırılır. Bu sebeple, kimyasal pullandırmayla üretilen nanolevhaların yanal alanlarında boyut farklılıkları meydana gelebilir (Maluangnont vd., 2013). Nanolevhaların kalınlıkları ise protonasyon işleminin verimine bağlıdır. Eğer protonasyon işlemi sırasında katmanlar arasındaki potasyum atomları hidrojen atomları ile tamamıyla yer değiştirmez ise katmanlar kısmi şekilde pullanarak farklı kalınlıklarda nanolevhalar elde edilir.



**Şekil 12.** Beş katmanlı nanofilm yapısının AKM görüntüsü (AFM image of the five-layered nanofilm)

Şekil 12 'deki AKM görüntüsü, 5 katmanlı filmin yüzey morfolojisini göstermekte olup genel olarak filmin düzgün bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır.

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

Yapılan çalışmada, tabaka-tabaka yöntemi için bir daldırmalı kaplama sistemi üretilmiştir. Bunun için SW Simulation programı ile oluşturulan katı modellere göre sigma profiller ve taret üretilerek birbirlerine monte edilmiştir. Sistem kısaca bir denetleyici ve bu denetleyiciye bağlı çevre bileşenlerini sahip olan bir gömülü yazılım ile yönetilmektedir. Sistemin performansını test etmek amacıyla nanofilm üretilmesi için NbO nanolevhaları sentezlenmiştir. Bunun için katmanlı  $K_4Nb_6O_{17} \cdot 3H_2O$  malzemesi klasik katı hal yöntemi ile üretilip malzemenin ara katmanı protone edilerek pullandırılmıştır. Bu işlemler sonucunda kalınlıkları yaklaşık 2 nm nanolevhalar elde edilmiştir. Nanofilm üretimi için negatif yüklü NbO nanolevhalar ve pozitif yüklü PDDA çözeltisi, otomatik daldırma sistemi kullanılarak kuartz alttaşlar üzerine dönüşümlü olarak yerleştirilmiştir. Daldırmalı kaplama sistemi ile elde edilen absorbands değerindeki artış manuel kaplama ile elde edilen nanofilmlerdeki absorbands oranındaki artış ile kalitatif olarak benzer özelliklere sahip olduğu görülmüştür. 250-300 nm aralığında katman sayısına bağlı olarak meydana gelen absorbands artışının nanolevhaların absorbandsından dolayı meydana geldiği için bu sonuca varılmıştır. Ancak iki kaplama arasında absorbands değerlerinde farklılıklar da görülmüştür. Manuel kaplamada (Ida vd. 2006) kullanılan nanolevha çözeltisi kalınlığı yaklaşık 1 nm olan tekli nanolevhalar meydana gelmektedir. Kaplama sistemi ile kullanılan çözelti ise en az iki katmandan oluşan nanolevhalar oluşmaktadır. Bu da manuel ve kaplama sistem kullanılarak yapılan kaplamalarda absorbands değerlerinde farklılıklara neden olmuştur. Ancak farklı boyutlarda nanolevhalar kullanılmasına rağmen sürece getirilen standardizasyon sayesinde katman sayısına bağlı olarak meydana gelen absorbands artışı, kaplama sistemi ile de tekrarlanabilmektedir.

Manuel kaplama ile aynı basamakları takip eden nanofilm üretim süreci, çalışmada sunulan daldırmalı kaplama sistemi kullanıldığında daldırma ve kurutma ilgili parametrelerde farklıları elimine ederek süreci standardize etmekte ve sürece manuel kaplamaya göre tekrarlanabilirlik kazandırmaktadır. Ayrıca sistemde üretim reçeteleri kayıt altına alınarak sistemdeki izleme penceresi sayesinde kaplamanın anlık ve grafiksel olarak kullanıcı

tarafından takip edilmesi mümkün hale gelmektedir. Çalışmada sunulan ve piyasadaki muadillerine göre çok daha düşük maliyetle üretilen kaplama sisteminin nanofilm üretim çalışmalarında kullanılabileceği düşünülmektedir.

### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 117M512 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

### Kaynaklar (References)

- Akatsuka, K., Haga, M., Ebina, Y., Osada, M., Fukuda, K., Sasaki, T. 2009. Construction of Highly Ordered Lamellar Nanostructures through Langmuir-Blodgett Deposition of Molecularly Thin Titania Nanosheets Tens of Micrometers Wide and Their Excellent Dielectric Properties, *ACS Nano*, 3, 1097–1106.
- Akatsuka, K., Takanashi, G., Ebina, Y., Haga, M., Sasaki, T. 2012. Electronic band structure of exfoliated titanium-and/or niobium-based oxide nanosheets probed by electrochemical and photoelectrochemical measurements, *The Journal of Physical Chemistry C*, 116, 12426–12433.
- Altuntasoglu, O., Matsuda, Y., Ida, S., Matsumoto, Y. 2010. Syntheses of zinc oxide and zinc hydroxide single nanosheets, *Chemistry of Materials*, 22, 3158–3164.
- Altuntasoglu, O., Unal, U., Ida, S., Goto, M., Matsumoto, Y. 2008. Characterization of self-assembled films of NiGa layered double hydroxide nanosheets and their electrochemical properties, *Journal of Solid State Chemistry*, 181, 3257–3263.
- Cai, X., Ma, R., Ozawa, T. C., Sakai, N., Funatsu, A., Sasaki, T., 2014. Superlattice assembly of graphene oxide (GO) and titania nanosheets: fabrication, in situ photocatalytic reduction of GO and highly improved carrier transport. *Nanoscale*, 6, 23, 14419-14427.
- Decher, G., Hong, J.-D. 1991. Buildup of ultrathin multilayer films by a self-assembly process, consecutive adsorption of anionic and cationic bipolar amphiphiles on charged surfaces, in: *Makromolekulare Chemie. Macromolecular Symposia*, 321–327.
- Ding, S., Chen, J.S., Lou, X. W. D. 2011. One-Dimensional Hierarchical Structures Composed of Novel Metal Oxide Nanosheets on a Carbon Nanotube Backbone and Their Lithium-Storage Properties, *Advanced Functional Materials*, 21, 4120–4125.
- Hata, H., Kobayashi, Y., Mallouk, T. E. 2007. Encapsulation of anionic dye molecules by a swelling fluoromica through intercalation of cationic polyelectrolytes. *Chemistry of Materials*, 19, 1, 79–87.
- Ida, S., Araki, K., Unal, U., Izawa, K., Altuntasoglu, O., Ogata, C., Matsumoto, Y. 2006. Photoluminescence properties of multilayer oxide films intercalated with rare earth ions by the layer-by-layer technique, *Chemical communications*, 3619–3621.
- Ida, S., Ogata, C., Unal, U., Izawa, K., Inoue, T., Altuntasoglu, O., Matsumoto, Y. 2007. Preparation of a blue luminescent nanosheet derived from layered perovskite  $\text{Bi}_2\text{SrTa}_2\text{O}_9$ , *Journal of the American Chemical Society*, 129, 8956–8957.
- Iler, R.K. 1966. Multilayers of colloidal particles, *Journal of colloid and interface science*, 21, 569–594.
- Izawa, K., Yamada, T., Unal, U., Ida, S., Altuntasoglu, O., Koinuma, M., Matsumoto, Y. 2006. Photoelectrochemical oxidation of methanol on oxide nanosheets, *The Journal of Physical Chemistry B*, 110, 4645–4650.
- Keller, S. W., Kim, H.-N., Mallouk, T. E., 1994. Layer-by-Layer Assembly of Intercalation Compounds and Heterostructures on Surfaces: Towards Molecular "Beaker" Epitaxy, *Journal American Chemical Society*, 116, 8817–8818.
- Kondo, T., Yamada, R., Uosaki, K. 2013 In *Organized Organic Ultrathin Films: Fundamentals and Applications*, 1st ed.; Ariga, K., Ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, 7–42.
- Li, B.-W., Osada, M., Ebina, Y., Ueda, S., Sasaki, T. 2016. Coexistence of Magnetic Order and Ferroelectricity at 2D Nanosheet Interfaces, *Journal of the American Chemical Society*, 138, 7621–7625.
- Li, B.-W., Osada, M., Ozawa, T.C., Ebina, Y., Akatsuka, K., Ma, R., Funakubo, H., Sasaki, T. 2010. Engineered interfaces of artificial perovskite oxide superlattices via nanosheet deposition process, *ACS Nano*, 4, 6673–6680.
- Ma, R., Liu, Z., Li, L., Iyi, N., Sasaki, T. 2006. Exfoliating layered double hydroxides in formamide: a method to obtain positively charged nanosheets, *Journal of Materials Chemistry*, 16, 3809–3813.
- Ma, R., Sasaki, T., 2010. Nanosheets of oxides and hydroxides: Ultimate 2D charge-bearing functional crystallites, *Advanced Materials*, 22, 5082–5104.
- Madaro, F., Sæterli, R., Tolchard, J.R., Einarsrud, M.A., Holmestad, R. and Grande, T., 2011. Molten salt synthesis of  $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$ ,  $\text{K}_2\text{Nb}_4\text{O}_{11}$  and  $\text{KNb}_3\text{O}_8$  crystals with needle- or plate-like morphology. *CrystEngComm*, 13, 1304–1313.
- Maluangnont, T., Matsuba, K., Geng, F., Ma, R., Yamauchi, Y., Sasaki, T. 2013. Osmotic swelling of layered compounds as a route to producing high-quality two-dimensional materials. A comparative study of tetramethylammonium versus tetrabutylammonium cation in a lepidocrocite-type titanate. *Chemistry of Materials*, 25, 15, 3137–3146.
- Nguyen, M. D., Yuan, H., Houwman, E. P., Dekkers, M., Koster, G., ten Elshof, J. E., Rijnders, G. 2016. Highly oriented growth of piezoelectric thin films on silicon using two-dimensional nanosheets as growth template layer. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8, 45, 31120–31127.
- Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., Firsov, A.A. 2004. Electric field effect in atomically thin carbon films, *Science*, 306, 666–669.
- Osada, M., Sasaki, T., Ono, K., Kotani, Y., Ueda, S., Kobayashi, K. 2011. Orbital reconstruction and interface ferromagnetism in self-assembled nanosheet superlattices, *ACS Nano*, 5, 6871–6879.
- Sasaki, T., Ebina, Y., Tanaka, T., Harada, M., Watanabe, M., Decher, G. 2001. Layer-by-layer assembly of titania nanosheet/polycation composite films, *Chemistry of Materials*, 13, 4661–4667.



- Seo, S., Choi, H., Kim, S. Y., Lee, J., Kim, K., Yoon, S., Lee, B. H., Lee, S. 2018. Tungsten Diselenide: Growth of Centimeter-Scale Monolayer and Few-Layer WSe<sub>2</sub> Thin Films on SiO<sub>2</sub>/Si Substrate via Pulsed Laser Deposition, *Advanced Materials Interfaces*, 5, 1870098.
- Shibata, T., Takanashi, G., Nakamura, T., Fukuda, K., Ebina, Y., Sasaki, T. 2011. Titanoniobate and niobate nanosheet photocatalysts: superior photoinduced hydrophilicity and enhanced thermal stability of unilamellar Nb<sub>3</sub>O<sub>8</sub> nanosheet, *Energy and Environmental Science*, 4, 535–542.
- Uppuluri, R., Gupta A. R., Rosas, A. S., Mallouk, T. E. 2018. Soft chemistry of ion-exchangeable layered metal oxides, *Chemical Society Reviews*, 47, 2401-2430.
- Wang, L., Omomo, Y., Sakai, N., Fukuda, K., Nakai, I., Ebina, Y., Takada, K., Watanabe, M., Sasaki, T. 2003. Fabrication and characterization of multilayer ultrathin films of exfoliated MnO<sub>2</sub> nanosheets and polycations. *Chemistry of Materials*, 15, 15, 2873-2878.
- Wang, C., Osada, M., Ebina, Y., Li, B.-W., Akatsuka, K., Fukuda, K., Sugimoto, W., Ma, R., Sasaki, T., 2014. All nanosheet ultrathin capacitors assembled layer-by-layer via solution-based processes, *ACS Nano*, 8, 2658–2666.
- Wang, L., Sakai, N., Ebina, Y., Takada, K., Sasaki, T. 2005. Inorganic multilayer films of manganese oxide nanosheets and aluminum polyoxocations: fabrication, structure, and electrochemical behavior. *Chemistry of Materials*, 17, 6, 1352-1357.
- Wang, Z., Shen, Y., Ito, Y., Zhang, Y., Du, J., Fujita, T., Hirata, A., Tang, Z., Chen, M. 2018. Synthesizing 1T–1H Two-Phase Mo<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>S<sub>2</sub> Monolayers by Chemical Vapor Deposition. *ACS Nano*, 12, 1571-1579.
- Yang, N., Zhang, Y., Halpert, J.E., Zhai, J., Wang, D., Jiang, L. 2012. Granum-Like Stacking Structures with TiO<sub>2</sub>-Graphene Nanosheets for Improving Photoelectric Conversion, *Small*, 8, 1762–1770.



## BİR BİLEK ORTEZİ İÇİN PASİF REHABİLİTASYON VE DİRENÇLİ EGZERSİZ UYGULAMA MODLARININ GELİŞTİRİLMESİ

Ergin KILIÇ\*, Özgür BAŞER

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

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Robotik Rehabilitasyon, Bilek Rehabilitasyonu, Pasif Rehabilitasyon, Dirençli Egzersizler, EMG Sinyalleri.</i>	Günümüzde gittikçe artan yaşlı nüfusa ve yaşanan kazalara bağımlı olarak kısmi felçli insan sayısı sürekli artmakta olup gün geçtikçe terapistlerin emek, zaman ve maliyet olarak bu külfeti karşılamaları giderek zorlaşmaktadır. Robotik rehabilitasyon ise ev ortamı rahatlığında daha uzun süreli ve düşük maliyetli bir tedavi seçeneği sunmakta olup bu cihazlar yardımıyla tekrarlanabilir, ölçülebilir ve kontrol edilebilir uzuv hareketlerin yaptırılması oldukça kolaydır. Bu çalışmada el bileği rehabilitasyonu için geliştirilmiş olan bir aktif bilek ortezine hem pasif rehabilitasyon hem de dirençli egzersiz uygulamalarının yaptırılması amacıyla iki ayrı denetim modu daha eklenerek bir bilek rehabilitasyonunda ihtiyaç duyulacak tüm gereksinimlerin tek bir cihaz ile karşılanabilmesi sağlanmıştır.

## DEVELOPMENT OF PASSIVE REHABILITATION AND RESISTIVE EXERCISE APPLICATION MODES FOR A WRIST ORTHOSIS

Keywords	Abstract
<i>Robotic Rehabilitation, Wrist Rehabilitation, Passive Rehabilitation, Resistive Exercises, EMG Signals.</i>	Nowadays, the number of people with hemiplegia is constantly increasing due to the cumulative elderly population and accidents, henceforth; it is becoming difficult for therapists to meet this burden as labor, time and cost. Robotic rehabilitation provides a longer lasting and cost-effective treatment option in the comfort of home environment, and it is very easy to make repeatable, measurable and controllable limb movements with the help of these devices. In this study, two separate control modes were added to an active wrist orthosis developed for wrist rehabilitation in order to perform both passive rehabilitation and resistive exercise applications, therefore; it is ensured that all the requirements that will be needed in a wrist rehabilitation can be met with a single device.

### Alıntı / Cite

Kılıç, E., Başer, B., (2020). Bir Bilek Ortezi İçin Pasif Rehabilitasyon ve Dirençli Egzersiz Uygulama Modlarının Geliştirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 33-41.

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

E. Kılıç, 0000-0002-3099-0303  
Ö. Başer, 0000-0002-7284-9797

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	08.02.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	29.05.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	10.07.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

### 1. Giriş (Introduction)

Konvansiyonel rehabilitasyon süreci hasta ve terapist arasındaki etkileşime dayalı gerçekleştirilmekte olup bu da ciddi bir emek, zaman ve maliyet külfetine yol açmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte terapist üzerindeki iş yükünü ciddi ölçüde ortadan kaldıran ve ihtiyaca yönelik programlanabilir rehabilitasyon robotları sayesinde fiziksel rehabilitasyon uygulamalarının daha etkin bir şekilde yürütüldüğü bilinmektedir. Robotik rehabilitasyonun bir diğer önemli avantajı ise hastaların ev ortamlarında kendi başlarına doğrudan rehabilitasyon robotları ile etkileşime girerek tedavileri için gerekli olan egzersizleri daha uzun vadede gerçekleştirebilmeleridir. Ayrıca konvansiyonel rehabilitasyon sürecinde iyileştirici hareket uygulamalarının etkinliği ve verimliliği doğrudan terapistin kişisel performansına bağlıyken robotik rehabilitasyonda ise kinematik yapısı tanımlanabilen

\* İlgili yazar / Corresponding author: erginkilic@sdu.edu.tr, +90-246-211-1252

çok daha kontrollü (tekrarlanabilir, ölçülebilir, ayarlanabilir) hareketlerin yaptırılması söz konusudur. Sık ve tekrarlı uzuv hareketlerin yapılmasıyla yeni nöronların sürekli uyarılması sağlanarak zarar görmüş sinir bağlantıları yerine yeni sinir iletim hatlarının oluşturulduğu ve böylelikle kaybedilmiş fonksiyonların çok daha hızlı bir şekilde geri kazanılabildiği nöroplastisite konusunda yapılmış bilimsel çalışmalarda bildirilmektedir (Cauraugh ve Summers, 2005; Dean vd., 2000; Kahn vd., 2006). Sonuç olarak daha çok sıklıkta ve tekrarda gerçekleştirilen egzersizlerin etkinliği kanıtlanmış olup uzun süreli sıkılmadan ve yorulmadan çalışabilen robotlar yardımıyla bu zahmetli ve yorucu süreç çok daha kolay bir şekilde aşılabilmektedir (Colombo vd., 2001; Lum vd., 2002). Robotik rehabilitasyon odaklı fizik tedavi programlarının hastalarda kaybedilmiş fonksiyonların geri kazanımında büyük rol oynadığı gerçekleştirilen klinik çalışmalarda sunulmaktadır. Klinik çalışmalarda geniş yer alan ilk robotik sistem MIT-MANUS (Krebs vd., 1998) olup 20 felçli hastaya 11 hafta boyunca günlük birer saatlik tedavi uygulandığında hastaların omuz ve dirsek kısımlarındaki bozuklukların azaldığı görülmüştür. Benzer olarak alt uzuvların tedavi edilmesi için tasarlanan bir rehabilitasyon robotu ile 10 dakikadan oluşan 16 seanslık bir tedavi uygulanmış ve tedavi sonucunda hastaların adım sayılarında ve tempolarında önemli gelişmeler yaşandığı görülmüştür (Kubota vd., 2013).

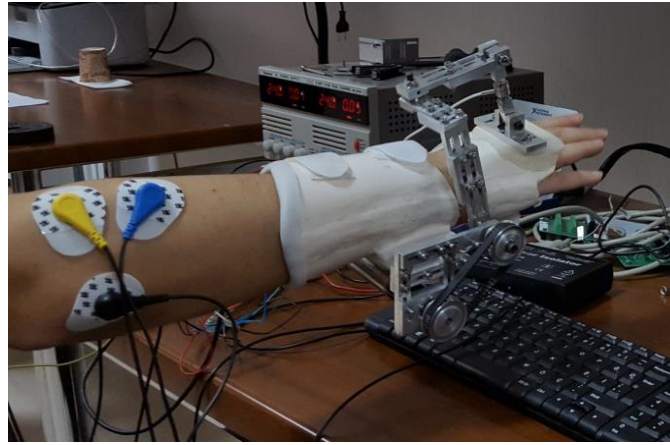
Günümüzde yaşlı nüfusun artışına bağlı olarak felçli insan sayısı da sürekli artmaktadır. Felç sonrası sinirlerde oluşan hasarlar bireylerin üst ya da alt uzuv eklemlerini ciddi ölçüde etkileyerek günlük yaşam faaliyetlerini sürdürmelerine engel olmaktadır. Ayrıca, insanlar doğuştan kaynaklanan nedenlerle olabildiği gibi çeşitli kazalardan dolayı da sakat kalabilmektedirler. Özellikle travmatik beyin ve omurilik yaralanmalarında sinir hasarları oluşmakta ve genellikle uzuv hareketlerinde kalıcı hasarlar meydana gelmektedir. İşlevini yitirmiş ve insan hayatını olumsuz yönde etkileyen kırık ya da felçli uzuvların tedavisinde şüphesiz fiziksel rehabilitasyon oldukça önemli iyileştirici bir faktördür. Örneğin 35 yaş üzeri bayanlarda her yıl binde dört oranında bilek kırığı vakasına rastlanılmakta (O'Neill vd., 2001) olup ciddi bilek kırıkları tespit edilen hastalara fizyoterapi uygulanarak hasarlı uzuvlara yeniden işlev kazandırılmaktadır (Bruger vd., 2013). El bileği üzerine geliştirilen aktif ortezler incelendiğinde görülmektedir ki, Takahashi vd. (2008) felçli hastaların el ve bilek tedavisi için 3 serbestlik dereceli ve pnömatik eyleyicileri olan HWARD (Hand Wrist Assisting Robotic Device) isimli bir ortez kullanmıştır. Ayrıca Chapuis vd. (2010) tarafından bilek eklemleri için tek serbestlik dereceli ReFlex isimli bir rehabilitasyon cihazı geliştirilmiş olup cihaz kullanıcısı kişilerin motor öğrenme becerilerinin ciddi ölçüde artırılması sağlanmıştır. Geliştirilen cihazın fleksiyon ve ekstansiyon hareketleri için çalışma aralığının  $\pm 75^\circ$  olduğu ve parçacık fren (particle brake) teknolojisinden faydalanılarak 4 Nm seviyesinde bir direnç torqu oluşturulabildiği belirtilmiştir. Erdoğan vd. (2011) tarafından ise ön kol ve bilek rehabilitasyonu için sabit platforma bağlı bir dış iskelet robot tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilerek el bileğine fleksiyon/ekstansiyon yönlerinde yaklaşık 5 Nm dolaylarında destek torqu sağlanabildiği açıklanmıştır. Felçli hastalara tekrarlı bilek hareketleri yaptırmak adına Kinetic Muscles Inc. firması tarafından Hand Mentor isimli tek serbestlik dereceli bir bilek ortezi geliştirilmiş olup hastaların motor öğrenme becerilerini yeniden kazanabildikleri Kutner vd. (2010) tarafından gösterilmiştir. Kang vd. (2013) ise omurilik zedelenmesi olan kişiler için hastaların özellikle el fonksiyonlarını yeniden kazanmaları amacıyla el bileğinin fleksiyon/ ekstansiyon hareketleri ile çalışan bir ortez geliştirmiştir. Squeri vd. (2014) tarafından ise felçli hastaların hem motor fonksiyonlarında oluşan kayıp miktarlarının belirlenmesi hem de motor fonksiyonlarının yeniden kazandırılması amacıyla empedans denetim mimarisi kullanılarak bir robotik sistem geliştirilmiş olup bu geliştirilen cihaz sayesinde fleksiyon/ekstansiyon yönlerindeki bilek hareketleri için 1 Nm seviyesinde yardımcı tork desteği sağlanabildiği açıklanmıştır.

Gerçekleştirilen literatür araştırmalarında, bilek rehabilitasyon robotlarının dirsek ve ön-kol için geliştirilmiş olan robotlara göre çok daha az sayıda çalışıldığı görülmüştür. Bilek rehabilitasyonu için araştırmacıların ilgi yoğunluğunun sınırlı sayıda kalması ve özellikle aktif bilek ortez geliştirilmesi konusunda bilimsel çalışmaların yetersiz olduğu Squeri vd. (2014) tarafından açıkça bildirilmektedir. Bu eksikliğin giderilmesine yönelik Kılıç ve Doğan (2017) tarafından bir aktif bilek ortez tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu cihazın aktif rehabilitasyon dışında tam ya da kısmi felçli hastaların pasif rehabilitasyon (tekrarlı egzersiz) süreçlerinde etkin bir şekilde kullanılması mümkün olup hastanın bu esnadaki kas EMG sinyal seviyeleri kayıt altına alınabilmektedir. Pasif rehabilitasyon sürecinde cihaz kullanıcısının kaslarında en ufak bir iyileşme olduktan sonra ise hasta aktif rehabilitasyon sürecine geçebilecektir. Cihazın aktif rehabilitasyon sürecine ilişkin çalışma modları daha önce bir bulanık mantık kontrolcüsü kullanılarak Kilic ve Dogan (2017) tarafından ve bir takım yapay sinir ağ modelleri kullanılarak ise Kilic (2017) tarafından başarıyla gerçekleştirilmiştir. Aktif rehabilitasyon sürecinde cihaz kontrolü EMG sinyalleri üzerinden tamamen hastaya bırakılmakta olup bir takım sinyal işleme yöntemleri ve tasarlanmış olan ileri düzey kontrolcüler yardımıyla cihazın kontrolü başarıyla gerçekleştirilmiştir. Aktif rehabilitasyon sürecinden sonra ise kasların iyice güçlendirilmesi için dirençli egzersiz tedavilerine başlanması gerekmektedir. Yine bu çalışmada oluşturulmuş olan düşük/orta/yüksek ve sanal yük etkili dirençli egzersizler ile bir bilek tedavi sürecinin son aşamasında ihtiyaç duyulan dirençli egzersizler için gerekli olan tüm ayarlanabilir atalet, viskoz sürtünme ve ağırlık hissi oluşturacak sanal ortam çalışmaları önerilen bu çalışmada sunulmaktadır. Bölüm 2'de tasarlanmış ve üretilmiş olan aktif bilek ortezin kısa bir tanıtımı yapılmaktadır. İlgili cihaz üzerinde ilk defa gerçekleştirilen tekrarlı bilek hareketleri (pasif rehabilitasyon) ve dirençli egzersiz uygulamaları detaylı bir

şekilde Bölüm 3'te sunulmakta olup çalışmanın özgünlük içeren kısmını oluşturmaktadır. Sonuç ve Tartışma kısmı ise Bölüm 4'te yer almaktadır.

## 2. Aktif Bilek Ortezi (Active Wrist Orthosis)

Sağ ön kol ve el ayasına giyilebilir şekilde tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş olan bilek ortezi Şekil 1'de gösterilmektedir. Görüleceği üzere bir dişli kayış tahrik sistemi üzerinden üretilen motor torku el ayasına aktararak el bileğine  $\pm 70^\circ$  açı limitlerinde arzulanan fleksiyon ve ekstansiyon hareketler yaptırılmaktadır. Neredeyse bütün cihaz uzuvları ayarlanabilir olup geniş bir yaş aralığı için kullanıma uygun hale getirilmeye çalışılmıştır. Cihazda alüminyum ve termo-plastik ağırlıklı parçalar kullanılmış olup cihazın toplam ağırlığı tüm eyleyici ve sensör sistemleri dahil 700 gram civarındadır. Cihazda 90-W gücünde fırçasız elektrik motoru (Maxon® EC-4pole, Part number 323218) kullanılmış olup 53.5 mNm'lik nominal motor torku ve 14700 dev/dak'lık nominal motor hızı 104:1'lik bir planet dişli sistemi (Maxon® Planetary Gearhead, Part number 370783) ve akabinde kullanılan 3:1'lik bir dişli kayış-kasnak tahrik sistemi (HDT-3M) vasıtasıyla el bileğine rahatlıkla 10 Nm üzeri torku yaklaşık  $360^\circ/s$  hızlara kadar sağlayabilecek düzeydedir. Ayrıca cihaz üzerinde  $\pm 200$  N ölçüm kapasitesine sahip minyatür bir kuvvet sensörü (Burster® Model: 8417) ile 2000 darbe/devir'lik bir optik enkoder yer almaktadır. Bilek hareketlerinden sorumlu olan Extensor Carpi Radialis (ECR) ve Flexor Carpi Radialis (FCR) ön kol kaslarının aktivasyon seviyelerini ölçmek için 2 adet EMG sensörü (MyoScan™ Sensor-T9503M) kullanılmaktadır. EMG sinyalleri 1kHz'lik örnekleme frekansı altında 16 bit'lik Analog-Dijital Çeviriciye (ADC) sahip bir veri toplama kartı (National Instruments PCI-6221) üzerinden kayıt altına alınmaktadır.

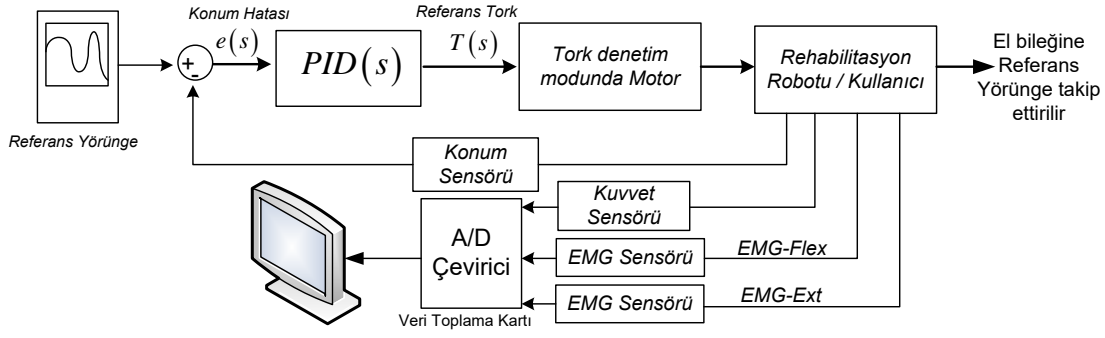


Şekil 1. Çalışmada kullanılan aktif bilek ortezi (Active wrist orthosis used in the study)

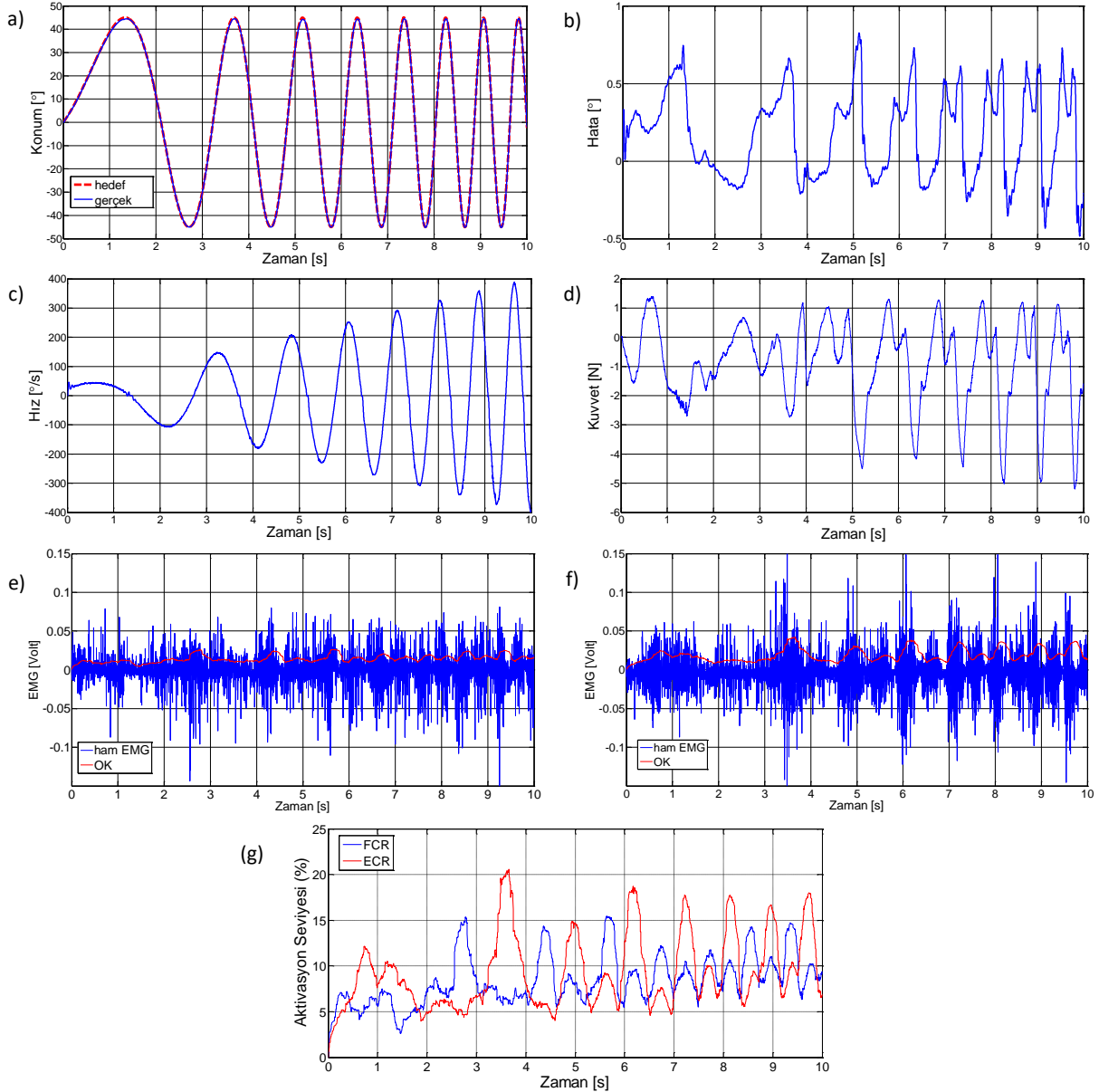
## 3. Kontrol Yöntemleri ve Deneysel Sonuçlar (Control Methods and Experimental Results)

### 3.1. Pasif Rehabilitasyon (Passive Rehabilitation)

Önemle belirtmek gerekir ki; bu makalede kullanılan kontrolcülerin çalışma performansları söz konusu bilek ortezi dinamik modelinin kurulduğu bir benzetim ortamında test edilmesinden sonra deney uygulamalarına geçilmiştir (Kılıç ve Doğan, 2018). Cihazın ilk olarak kapalı çevrim pozisyon kontrol testleri gerçekleştirilmiştir. Cihaz kullanıcısı bu kontrol modunda tamamen pasif durumda olup özellikle kısmi ya da tam felçli hastaların tedavilerinde kullanılması amaçlanmıştır. Bu kontrol yöntemindeki temel amaç bir hareketi sıklıkla ve tekrarlı bir şekilde yaptırarak hastanın merkezi sinir sisteminde bulunan motor nöronların uyarılmasını ve kaybedilen fonksiyonların yavaş yavaş geri kazanılmasını sağlamaktır. Şekil 2'de görüldüğü üzere konum kontrolcüsü için bir PID (Proportional Integral and Derivative) denetleyici tasarlanmış olup ilgili katsayılar sırasıyla P için 800, I için 10 ve D için ise 5 olarak ayarlanmıştır. Cihazın motor sürücüsü tork denetim modunda çalışmakta olup PID kontrolcü vasıtasıyla referans yörüngesinin minimum hata ile takip edilmesi sağlanmaktadır. Aynı zamanda kuvvet sensörü ve EMG sensörleri üzerinden de ölçümler alınarak gerçekleştirilen testler esnasında kullanıcı eline aktarılan kuvvetler ve kullanıcının ön kol kaslarının EMG seviyeleri gibi kritik öneme sahip veriler Şekil 3'te gösterildiği üzere veri toplama kartı sayesinde anlık olarak gözlemlenebilmekte ve kayıt altına alınabilmektedir.



Şekil 2. Pasif rehabilitasyon denetim mimarisi (Passive rehabilitation control architecture)



Şekil 3. Pasif rehabilitasyon uygulama sonuçları; a) konum, b) konum hatası, c) hız, d) kuvvet, e) EMG fleksiyon, f) EMG ekstansiyon, g) kas aktivasyon seviyeleri (Passive rehabilitation results; a) position, b) position error, c) velocity, d) force, e) EMG flexion, f) EMG extension, g) muscle activation levels)

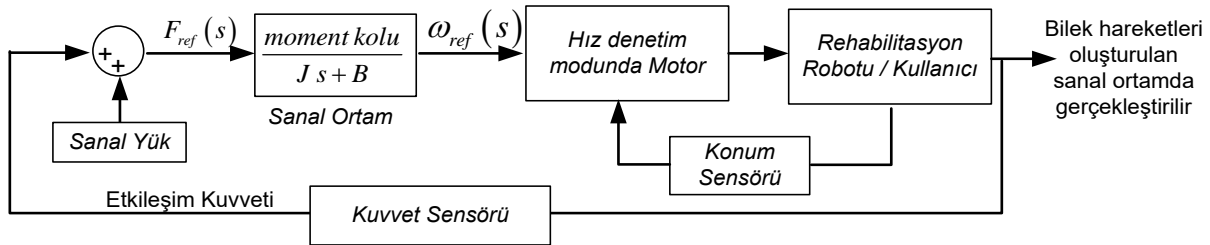
İlk önce Şekil 3a'da gösterilen sinüs sinyal yapısında bir referans konum profili ile el bileğine  $\pm 45^\circ$  arasında 10 saniye boyunca 7-8 kez önce yavaş frekanslardan (0.1 Hz) başlayarak daha sonra ise hızlı frekanslara (1 Hz) kadar Fleksiyon/Ekstansiyon hareketler yaptırılmaktadır. Şekil 3b'den görüleceği üzere konum hataları bu süre zarfında  $[-0.48^\circ, 0.82^\circ]$  arasında ölçülmüş olup tüm hareket boyunca oluşan hataların ortalama karekök değeri ise  $0.33^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Şekil 3c'de ise cihaz ve el bileği hızının 10. saniyede yaklaşık  $400^\circ/\text{s}$  hızlarına kadar



çıkabildiği görülmektedir. Şekil 3d ise el ayası ile cihaz arasında oluşan etkileşim kuvvetlerini göstermekte olup bu kuvvetin maksimum mutlak değeri 5 N dolayındadır. Bu esnada FCR ve ECR kaslarından ölçülen ham EMG verileri ve bunların ortalama karekök değerleri ise sırasıyla Şekil 3e ve Şekil 3f'de sunulmaktadır. Şekil 3g'de ise kasların aktivasyon seviyeleri gösterilmekte olup her iki kasında yaklaşık yaklaşık %15 seviyelerinde aktive edildiği görülmektedir. Böylelikle geliştirilen cihaz yardımıyla bir pasif rehabilitasyon sürecinde ihtiyaç duyulan eklem açıklıklarında ve arzulanan hız aralığında tekrarlı bilek hareketleri kolaylıkla yaptırılabilir olup bu esnada cihazın hastaya uyguladığı kuvvet desteği ve hastanın ön kol kaslarında yaşanacak olan iyileşmeler ise EMG sinyal seviyeleri üzerinden rahatlıkla gözlemlenebilecektir. Pasif rehabilitasyon uygulamaları hem hastalar hem de terapistler için çok zorlu ve yorucu bir süreç olup bu çalışmada gösterildiği üzere hastalar artık bir rehabilitasyon merkezine ve bir terapistle bağımlı kalmadan daha uzun bir zaman boyunca ev ortamında tedavilerine rahatça devam edebileceklerdir.

### 3.2. Dirençli Egzersizler (Resistive Exercises)

Rehabilitasyon robotları kullanılarak genelde hastaya belirli bir direnç kuvveti hissettirilir ve bu direnç kuvveti altında hastanın bir hedef yörüngesi takip etmesi istenir. Böylelikle hasta kaslarının güçlendirilmesi amaçlanır. Cihazın dirençli egzersiz modu için Şekil 4'te gösterilen admitans model tabanlı bir denetim mimarisi tasarlanmıştır ve ilgili parametrelerin (J, B ve Sanal Yük) ayarlanması ile cihaz kullanıcı için bir sanal ortam oluşturulmuştur. Bu ayarlanabilir parametreler sırasıyla atalet (J), viskoz sürtünme (B) ve sanal yükün yer çekimi ağırlığıdır. Egzersizler sırasında kullanıcıya kendi hareketleri ve izlemesi gereken hedef yörünge bilgisayar ekranında gösterilmektedir. Cihaz kullanıcı hedef yörüngesi takip etmeye çalışırken yörüngeden sapma hataları, cihaz ile kullanıcı arasındaki etkileşim kuvvetleri, bilek eklem hızı ve FCR ile ECR kaslarından ölçülen EMG verileri sürekli ve anlık olarak kayıt altına alınmaktadır.

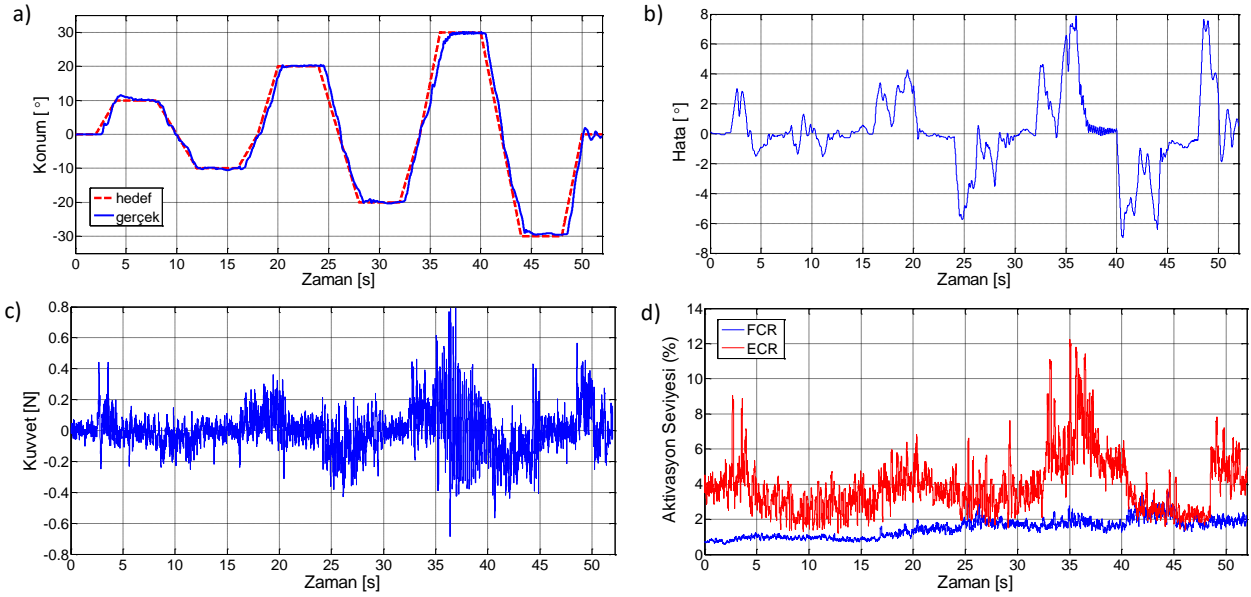


Şekil 4. Dirençli yük denetim mimarisi (Resistive load control architecture)

#### 3.2.1 Düşük Dirençli Egzersiz (Low Resistive Exercise)

Düşük dirençli egzersiz için ilgili parametreler;  $J = 5 \times 10^{-5}$  [kg.m<sup>2</sup>],  $B = 5 \times 10^{-4}$  [N.m/(°/s)], Moment Kolu = 0.05 [m] ve Sanal Yük = 0 [N] değerlerine ayarlanmıştır. Bu değerler robotun kontrol sisteminde kararsızlık yaratmayacak şekilde seçilebilecek minimum J ve B parametre değerleridir. Moment Kolu değeri sabit olup cihazı kullanan kişinin yaklaşık el ayası uzunluğudur. Bu kullanılan parametre değerleri ile bilek ekleminde hissedilecek olan eylemsizlik ve viskoz sürtünme etkisi mümkün olan minimum seviyelere çekilmiştir. Böylelikle cihaz kullanıcı çok düşük kas kuvvetleri ile Fleksiyon/Ekstansiyon bilek hareketlerini yapabilecektir.

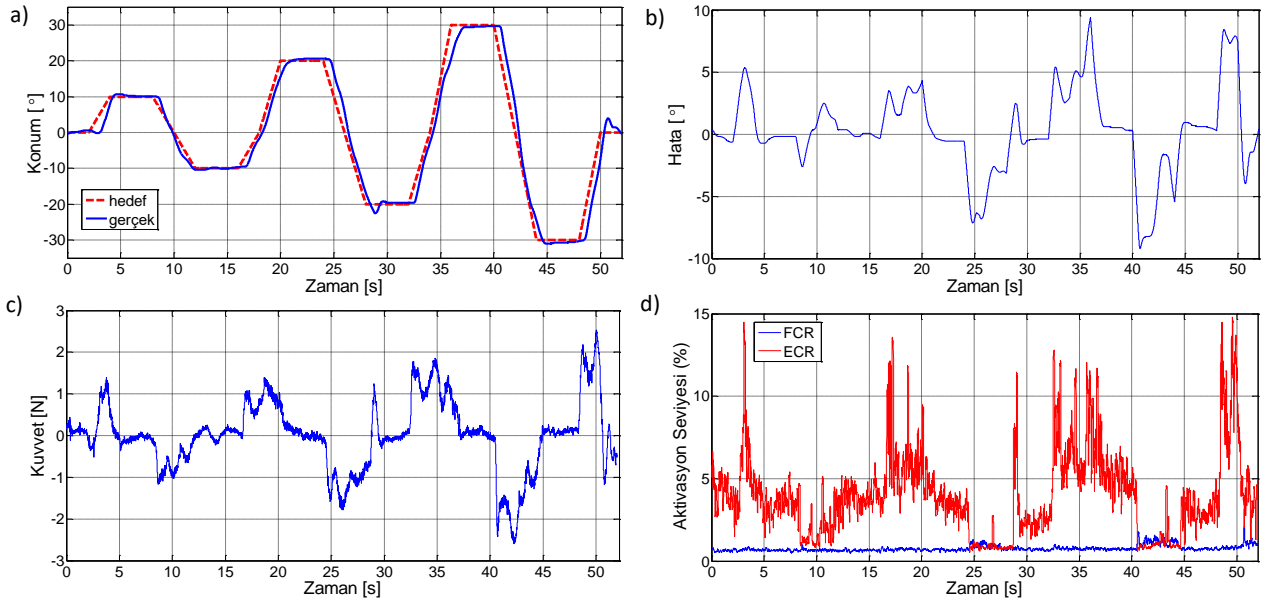
Şekil 5'te düşük dirençli egzersiz test sonuçları sunulmuş olup görüleceği üzere ölçülen etkileşim kuvvetlerinin seviyesi  $\pm 0.8$  [N] arasında değişmekte olup kullanıcının cihazı neredeyse hissetmediği rahatlıkla söylenebilir. Referans yörüngeye göre fark oluşturan hatalar  $[-6.93^\circ, 7.89^\circ]$  aralığında ölçülmüş olup tüm yörünge boyunca konum hatalarının ortalama karekök değeri ise  $2.44^\circ$  olarak hesaplanmıştır. FCR ve ECR kaslarının aktivasyon seviyeleri ise %10'nun altında olup ön kol kaslarının çok az çalıştırıldığı söylenebilir.



Şekil 5. Düşük dirençli egzersiz sonuçları; a) konum, b) konum hatası, c) kuvvet, d) kas aktivasyon seviyeleri (Low resistive exercise results; a) position, b) position error, c) force, d) muscle activation levels)

### 3.2.2 Orta Dirençli Egzersiz (Medium Resistive Exercise)

Orta dirençli egzersiz için ilgili parametreler;  $J = 5 \times 10^{-4}$  [kg. m<sup>2</sup>],  $B = 5 \times 10^{-3}$  [N. m/(°/s)], Moment Kolu = 0.05 [m] ve Sanal Yük = 0 [N] değerlerine ayarlanmıştır. Test sonuçları Şekil 6'da sunulmaktadır. Cihaz kullanıcısı artık el ayasında bir direnç hissetmeye başlamış olup söz konusu referans yörüngeyi takip ederken etkileşim kuvvetlerinin değeri görüldüğü üzere  $\pm 2$  [N] arasında değişmektedir. Referans yörüngeye göre ölçülen konum hataları  $[-9.19^\circ, 9.41^\circ]$  aralığında çıkmış olup tüm yörünge boyunca hataların ortalama karekök değeri ise  $3.27^\circ$  olarak hesaplanmıştır. FCR kas aktivasyon seviyesi %1-2 seviyelerinde olup ECR kasının aktivasyon seviyesinin ise %15'lere kadar çıktığı görülmektedir.

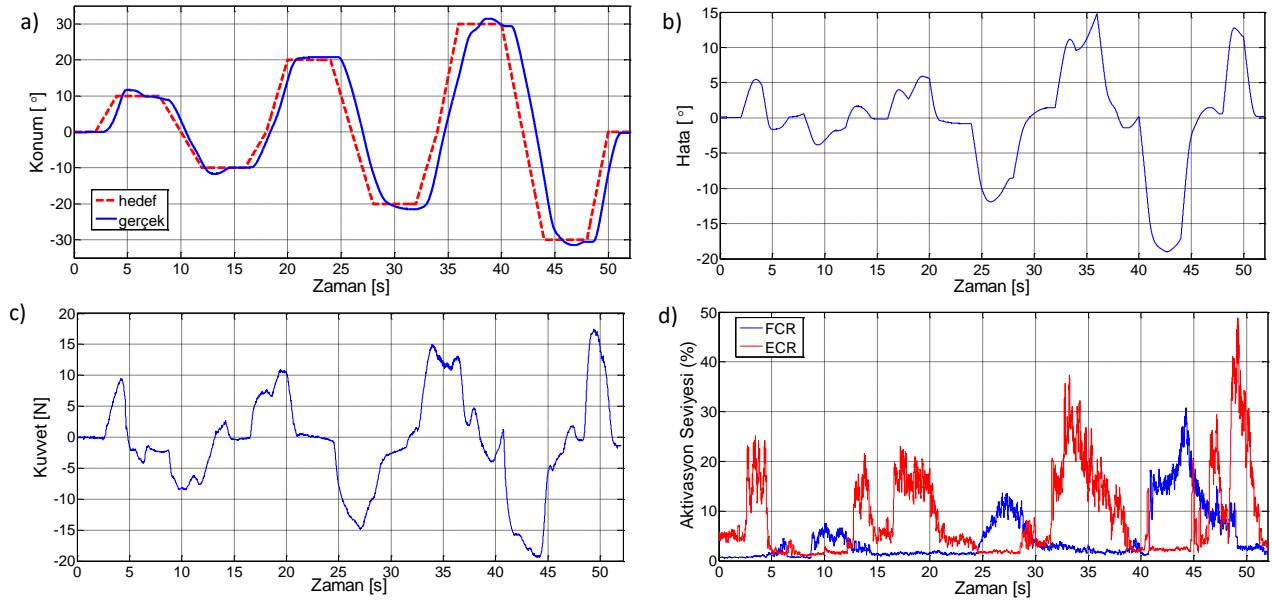


Şekil 6. Orta dirençli egzersiz sonuçları; a) konum, b) konum hatası, c) kuvvet, d) kas aktivasyon seviyeleri (Medium resistive exercise results; a) position, b) position error, c) force, d) muscle activation levels)

### 3.2.3 Yüksek Dirençli Egzersiz (High Resistive Exercise)

Yüksek dirençli egzersiz için ilgili parametreler;  $J = 5 \times 10^{-3}$  [kg. m<sup>2</sup>],  $B = 5 \times 10^{-2}$  [N. m/(°/s)] Moment Kolu = 0.05 [m] ve Sanal Yük = 0 [N] değerlerine ayarlanmıştır. Şekil 7'de sunulan sonuçlardan görüleceği üzere cihaz kullanıcısı artık el ayasında ciddi seviyede bir direnç kuvveti hissetmekte olup söz konusu referans yörüngeyi takip ederken ciddi ölçüde zorlanmaktadır. Etkileşim kuvvetlerinin değeri bu sefer  $\pm 20$  [N] arasında değişmektedir. Referans yörüngeye göre ölçülen konum hataları ise bu sefer  $[-18.98^\circ, 14.74^\circ]$  aralığında seyretmekte olup tüm

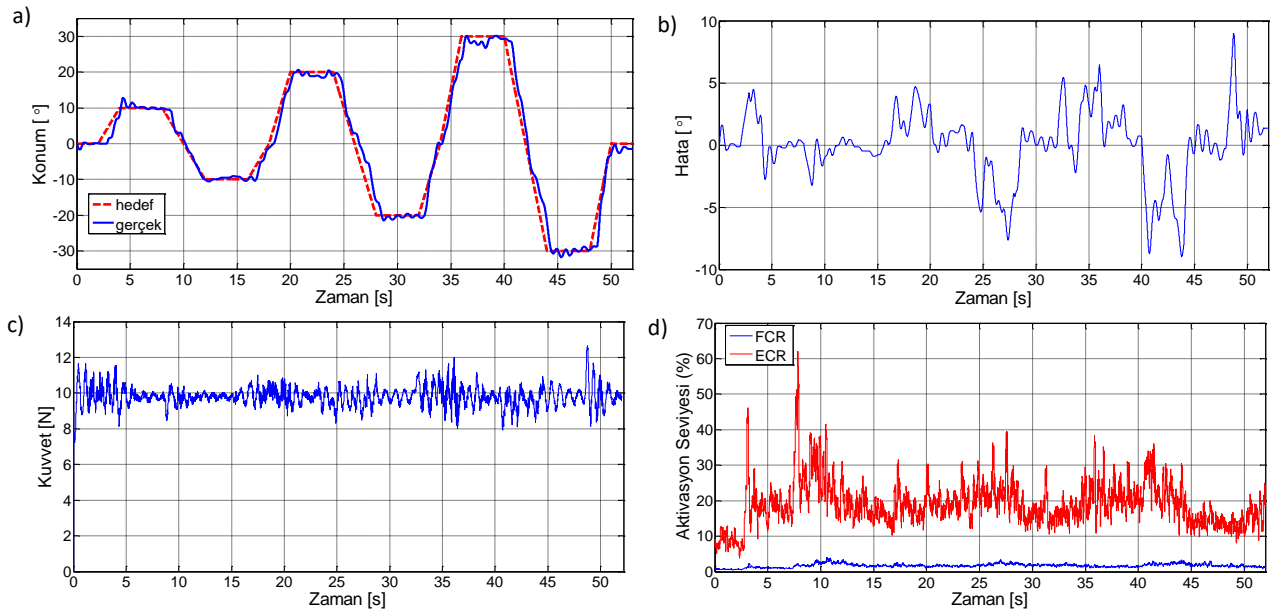
yörünge boyunca hataların ortalama karekök değeri ise  $6.91^\circ$  hesaplanmıştır. FCR kasının aktivasyon seviyesi %30, ECR kasının aktivasyon seviyesinin ise %40'lara kadar çıktığı görülmektedir.



**Şekil 7.** Yüksek dirençli egzersiz sonuçları; a) konum, b) konum hatası, c) kuvvet, d) kas aktivasyon seviyeleri (High resistive exercise results; a) position, b) position error, c) force, d) muscle activation levels)

### 3.2.4 Sanal Yük Uygulaması (Virtual Load Application)

Orta dirençli test parametre değerleri kullanılarak bu sefer Sanal Yük değeri +10 [N] olarak değiştirilmiştir. Böylelikle cihaz kullanıcısının el ayasına ECR kasını çalıştıracak yönde yaklaşık 1 kg'lık bir sanal yükleme yapılmıştır. Şekil 8'de sunulan sonuçlardan görüldüğü üzere kuvvet değerleri artık  $10 \pm 2$  [N] şeklinde değişmektedir. Referans yörüngeye göre ölçülen konum hataları  $[-8.98^\circ, 9.01^\circ]$  arasında değişmekte olup hareket boyunca toplam hataların ortalama karekökü ise  $2.71^\circ$  olarak hesaplanmıştır. FCR kas aktivasyon seviyesi %2 seviyelerinde olup ECR kası ise sürekli 10 [N]'luk sanal bir yüke maruz kalması nedeniyle yaklaşık %25 seviyelerinde sürekli aktive edilmektedir.



**Şekil 8.** Sanal yük egzersiz sonuçları; a) konum, b) konum hatası, c) kuvvet, d) kas aktivasyon seviyeleri (Virtual load exercise results; a) position, b) position error, c) force, d) muscle activation levels)

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

Bu çalışmada daha önce geliştirilmiş olan bir aktif bilek ortezi üzerine pasif rehabilitasyon ve dirençli egzersiz uygulamalarının yapılabilmesi için 2 ayrı rehabilitasyon modu eklenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel sonuçlardan

görülebileceği üzere cihaz pasif rehabilitasyon modunda iken arzulanan referans yörünge bir kapalı çevrim PID kontrolcü üzerinden başarıyla sağlayabilmektedir. Böylelikle tam ya da kısmi felçli hastaların ilk rehabilitasyon süreçlerinde etkin bir şekilde kullanılabilir olup hastanın bu hareketleri şimdiye kadar kaç kez ve hangi sıklıkta yaptığı kayıt altına alınıp tedaviyi yönlendirecek olan doktora sunulabilecektir. Pasif rehabilitasyon sürecinde çok sık tekrarlı bilek hareketleri yaptırılarak hasarlı sinir hücreleri yerine yeni iletim hatlarını oluşturabilecek sağlıklı sinir hücrelerinin devreye alınması amaçlanmaktadır. Ön kol kaslardan toplanan EMG sinyalleri tedavi süreci boyunca sürekli kayıt altına alınarak hastanın günden güne iyileşme belirtisi gözlemlenebilecektir. Hatta kasların yüzde olarak ne kadar aktive edildiği raporlanabilecektir. Hastanın kaslarında en ufak bir iyileşme gözlemlendikten sonra ise hasta aktif rehabilitasyon sürecine geçecektir. Aktif rehabilitasyon sürecinde cihaz kontrolü EMG sinyalleri üzerinden sağlanmakta olup cihaz tamamen hastadan gelen istemli komutlara göre çalışmaktadır. Yani cihaz kullanıcısı ön kol kaslarını az ya da çok kasarak cihazın düşük ya da yüksek hızlarda çalışmasını kontrol etmekte ve böylelikle konum kontrolünü de sağlayabilmektedir. Bilindiği üzere aktif rehabilitasyon sürecinden sonra ise kasların iyice güçlendirilmesi için dirençli egzersizlerin hastanın gelişim seviyesine uygun bir şekilde yapılması gerekmektedir. Özellikle bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş olan düşük/orta/yüksek ve sanal yük etkili dirençli egzersiz modları sayesinde bir bilek tedavi sürecinin son aşamasında ihtiyaç duyulan dirençli egzersizlerin başarıyla yapılabildiği gösterilmiştir. Bir bilek tedavisinde ihtiyaç duyulan atalet, viskoz sürtünme ve ağırlık hissi parametreleri farklı değerlere ayarlanarak sanal ortam testleri yapılmıştır. Test sonuçlarından görüleceği üzere parametre değerleri kademeli olarak arttırılmış ve cihaz kullanıcısının giderek ağırlaşan şartlar altında bileğini hareket ettirmek zorunda kaldığı gösterilmiştir. Böylece söz konusu cihaza 2 ayrı rehabilitasyon modu daha eklenerek cihazın olası tüm rehabilitasyon uygulamalarını yapabilecek düzeye ulaşması sağlanmıştır. Bundan sonra ki süreçte ise geliştirilmiş olan bu bilek rehabilitasyon cihazını gerçek hastalar üzerinde deneme testleri yapılarak cihazın iyileştirme etkilerine yönelik istatistiksel çalışmaların gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

### **Teşekkür (Acknowledgement)**

Bu çalışma 114M890 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olup desteklerinden dolayı makale yazarları TÜBİTAK'a en içten teşekkürlerini sunarlar.

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

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

### **Kaynaklar (References)**

- Bruder, A.M., Taylor, N.F., Dodd, K.J., Shields, N., 2013. Physiotherapy intervention practice patterns used in rehabilitation after distal radial fracture. *Physiotherapy*, 99 (3), 233-240.
- Cauraugh, J.H., Summers, J.J., 2005. Neural plasticity and bilateral movements: A rehabilitation approach for chronic stroke. *Progress in Neurobiology*, 75 (5), 309-320.
- Chapuis, D., Grave, R.B., Lamercy, O., Gassert, R., 2010. ReFlex, a Haptic Wrist Interface for Motor Learning and Rehabilitation. *IEEE Haptics Symposium*, 25-26 March, Waltham, Massachusetts, USA.
- Colombo, G., Wirz, M., Dietz, V., 2001. Driven gait orthosis for improvement of locomotor training in paraplegic patients. *Spinal Cord*, 39, 252-255.
- Dean, C.M., Richards, C.L., Malouin, F., 2000. Task-related circuit training improves performance of locomotor tasks in chronic stroke: A randomized, controlled pilot trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 81 (4), 409-417.
- Erdoğan, A., Satıcı, A.C., Patoglu, V., 2011. Passive Velocity Field Control of a Forearm-Wrist Rehabilitation Robot. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, Zurich, Switzerland.
- Kahn, L.E., Zygmant, M.L., Rymer, W.Z., Reinkensmeyer, D.J., 2006. Robot-assisted reaching exercise promotes arm movement recovery in chronic hemiparetic stroke: a randomized controlled pilot study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 3, 1-12.
- Kang, Y-S., Park, Y-G., Lee, B-S., Park, H-Y. 2013. Biomechanical evaluation of wrist-driven flexor hinge orthosis in persons with spinal cord injury. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 50 (8), 1129-1138.
- Kılıç, E., Doğan, E., 2017. Aktif bir bilek ortez tasarımı ve üretimi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5 (1), 33-44.
- Kılıç, E., Doğan, E., 2018. Aktif bir bilek ortezin kinematik ve kinetik analizleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 50-62.
- Kilic, E., 2017. EMG based neural network and admittance control of an active wrist orthosis. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31 (12), 6093-6106.
- Kilic, E., Dogan, E., 2017. Design and fuzzy logic control of an active wrist orthosis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 231 (8), 728-746.
- Krebs, H.I., Hogan, N., Aisen, M.L., Volpe, B.T., 1998. Robot-aided neurorehabilitation. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 6 (1), 75-87.

- Kubota, S., Nakata, Y., Eguchi, K., Kawamoto, H., Kamibayashi, K., Sakane, M., Sankai, Y., Ochiai, N., 2013. Feasibility of rehabilitation training with a newly developed wearable robot for patients with limited mobility. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 94 (6), 1080-1087.
- Kutner, N.G., Zhang, R., Butler, A.J., Wollf, S.L., Alberts, J.L., 2010. Quality-of-Life Change Associated With Robotic-Assisted Therapy to Improve Hand Motor Function in Patients With Subacute Stroke: A Randomized Clinical Trial. *Physical Therapy*, 90 (4), 493-504.
- Lum, P.S., Burgar, C.G., Shor, P.C., Majmundar, M., Van der Loos, M., 2002. Robot-assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper-limb motor function after stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83 (7), 952-959.
- O'Neill, T.W. et al. 2001. Incidence of distal forearm fracture in British men and women. *Osteoporosis International*, 12 (7), 555-558.
- Squeri, V., Masia, L., Giannoni, P., Sandini, G., Morasso, P. 2014. Wrist Rehabilitation in Chronic Stroke Patients by Means of Adaptive, Progressive Robot-Aided Therapy. *IEEE Transactions On Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 22 (2), 312-325.
- Takahashi, C.D., Der-Yeghiaian, L., Le, V., Motiwala, R.R., Cramer, S.C., 2008. Robot-based hand motor therapy after stroke. *Brain*, 131, 425-437.





## ÇİMENTO ESASLI KÖPÜK SIVANIN FİZİKSEL, MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLERİ

Metin DAVRAZ<sup>1\*</sup>, Yasin GÖKÇE<sup>2</sup>, Murat KORU<sup>3</sup>, Ali Ekrem AKDAĞ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Senirkent Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye

<sup>3</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>4</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknik Bilimler MYO, Optisyenlik Programı, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Çimento Esaslı Köpük Sıva,  
Isı Yalıtımı,  
Eşdeğer Kalınlık,  
Ekonomiklik.*

### Öz

Ülkemizde bina yalıtımında EPS ve XPS ısı yalıtım levhaları halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu malzemelerin düşük yangın dirençleri nedeniyle son yıllarda yüksek katlı binalarda kullanımı sınırlandırılmıştır. Bu tür yapılarda camyünü-taşyünü levhalar ve ısı yalıtım sıvaları gibi A sınıfı yangın dayanımına sahip malzemelerin kullanımı mümkündür. Ancak camyünü – taşyünü levhalarda su emme ve yüksek birim maliyetler önemli sorunlardır. Türkiye’de “ısı yalıtım sıvası” adı altında çok farklı marka ve türde ürün mevcuttur. Bu ürünlerin ısı iletkenlik açısından sorunlu olduğu da bilinmektedir. Bu çalışmada, yüksek performanslı, ekonomik ve kolay uygulanabilen farklı bir ürünün geliştirilmesi amaçlanmıştır. Köpük sıvada bağlayıcı olarak Portland çimentosu ve kireç, hafif agrega olarak genişletilmiş perlit, kaplı perlit, cam küre ya da diatomit kullanılmıştır. Köpük yoğunluğu 85 g/L dir. Tüm karışımlarda s/b oranı (0.5) sabittir. Üretilen numuneler üzerinde birim hacim kütle, basınç ve eğilme dayanımları, kılcal su emme, ısı iletkenlik deneyleri yürütülmüştür. Köpük sıva numunelerinin kuru yoğunlukları 250 kg/m<sup>3</sup>, 28 günde basınç dayanımları 250 kPa, kılcal su emme katsayıları  $\leq 0.4$  kg/m<sup>2</sup>.dak ve ısı iletkenlik katsayıları 0.065 W/mK dir. Köpük sıva numunelerinin birim maliyetleri geleneksel ısı yalıtım malzemelerinden 1.5-3.5 kat daha düşüktür. Sonuç olarak bu çalışma çimento esaslı köpük sıvanın büyük ölçüde geleneksel ısı yalıtım malzemelerine alternatif olabileceğini ortaya koymuştur.

## PHYSICAL, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF CEMENT-BASED FOAM PLASTER

### Keywords

*Cement Based Foam Plaster,  
Thermal Insulation,  
Equivalent Thickness,  
Economical.*

### Abstract

EPS and XPS thermal insulation boards are still widely used in building insulation in Turkey. However, the implementation of these materials has not allowed in recent years due to low fire resistance in high-rise buildings. It is possible to use materials of Class A fire resistance such as glass wool-stone wool sheets and thermal insulation plasters in such buildings. However, the significant problems encountered in glass wool - rock wool sheets are high water absorption and high unit costs. Many different brands and types of product which is defined as thermal insulation plaster are present in Turkey. However, it is a known fact that most of these products are problematic especially in terms of thermal conductivity. The aim of this study is to develop a new product with high performance, economical and easy application. Portland cement and lime as binder and, expanded perlite, coated perlite, sphere glass and diatomite as lightweight aggregate were used as binders in foam plaster mixtures. The density of the foam is 85 g/L. The water/binder ratio (0.5) was kept constant in all mixtures. Fresh and dry densities, compressive and flexural strengths, capillary water absorption and thermal conductivity tests were carried out on the specimens. Foam plaster specimens have a dry density of 250 kg/m<sup>3</sup>, a compressive strength of 250 kPa at 28 days, a capillary water absorption of 0.4 kg/m<sup>2</sup> and a thermal conductivity of 0.065 W/mK. The unit costs of foam

\* İlgili yazar / Corresponding author: metindavraz@isparta.edu.tr, +90-246-511-2739

plasters are 1.5-3.5 times lower than conventional thermal insulation materials. As a result, the study showed that cement based foam plaster can be an alternative to traditional thermal insulation materials.

#### Alıntı / Cite

Davraz, M., Gökçe, Y., Koru, M., Akdağ, A.E., (2020). Çimento Esaslı Köpük Sıvanın Fiziksel, Mekanik ve Termal Özellikleri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 42-53.

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

M. Davraz, 0000-0002-6069-7802  
Y. Gökçe, 0000-0001-7384-7921  
M. Koru, 0000-0002-6949-645X  
A.E. Akdağ, 0000-0002-3699-9376

#### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	18.05.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	11.07.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	16.07.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Yeryüzünde enerji kaynaklarının zamanla azalması, küresel ısınma, tüm ülkelerin enerji ihtiyaçlarını kontrol altına almalarını ve enerjiyi etkin kullanma yöntemleri geliştirmelerini zorunlu kılmıştır. Ülkemizde de başta sanayi ve konut sektörleri olmak üzere, enerji tüketimi her geçen yıl artmaktadır. Türkiye’de enerji tüketiminin %33’ü konutlarda, %39’u sanayide kullanılmaktadır. Konutlarda kullanılan enerjinin büyük bir bölümü ısıtma ve soğutma amaçlı tüketilmektedir. Enerjinin etkin kullanılması, ısı yalıtımı ile sağlanabilir (İMSAD, 2018).

Türkiye enerjide yaklaşık %75 oranında dışa bağımlıdır. Enerji ithalatı yıllık 55 milyar \$’ı bulmakta ve cari açığı en büyük paya sahip olmaktadır (XPS, 2019). Binaların ısıtma, soğutma ve havalandırmaya harcadığı enerji 17 milyar \$ seviyelerindedir. Almanya’da bir binayı ısıtmak ve soğutmak için yıllık enerji ihtiyacı 30-60 kwh/m<sup>2</sup> iken Türkiye’de 250-350 kwh/m<sup>2</sup>’dir. Kısacası Türkiye, daha soğuk bir iklime sahip Almanya’dan binaları ısıtmak veya soğutmak için neredeyse 10 kat daha fazla enerji tüketmektedir. Doğru bir ısı yalıtımı yapıldığında %50 enerji verimi elde edilmesiyle yaklaşık 8.5 milyar \$ enerji tasarrufu yapılabilir (Yaman vd, 2015).

Avrupa standartlarında, ısı iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ ) 0.065 W/mK’nin altında olan malzemeler ısı yalıtım malzemeleri, üstünde olanlar ise yapı malzemeleri olarak tanımlanır. Bir malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ ) ne kadar küçükse, yalıtımı o kadar iyi demektir. Ancak bu değer tek başına bir şey ifade etmez. Isı iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ ) ile malzemenin kalınlığı beraber değerlendirildiğinde, o malzemenin yalıtım özelliği ile ilgili bir sonuca ulaşılabilir. Bir malzemenin ısı iletkenlik değeri düşük olsa bile, yeterli kalınlığa ulaşamıyorsa bu malzemeyle ısı yalıtımı yapılamaz (Ünal, 2019).

Isı yalıtım malzemesi seçiminde bir diğer belirleyici özellik de malzemesinin yangın sınıfıdır. Temmuz 2015 tarihinde yayınlanan 29411 sayılı “Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik”e göre yüksekliği 28.5 m’den fazla olan binaların dış cephelerinin en az zor yanıcı (A1, A2), diğer binalarında en az zor alevlenici (B1) malzemenin olması gereklidir (Yangın yönetmeliği, 2007). Ülkemizde geliştirilmiş polistren (EPS) ve ekstrude polistren (XPS) en geniş pazar hacmine sahip yalıtım malzemeleri iken, son yıllarda yangın yönetmeliğinin getirdiği değişiklikler, talebi sıkıştırılmış camyünü ve taş yünü lehine değiştirmeye başlamıştır. Kalsiyum silikat esaslı yalıtım plakaları da son birkaç yıldır ısı yalıtım pazarında yer almaya başlamıştır.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nca yayınlanan “Isı Yalıtım Yol Yardım Haritası” belgesinde ısı yalıtım sıvaları ile yalıtım yapılamayacağı belirtilmiştir. Öncelikle bu ifade TS EN 998-1 standardını göz ardı etmektedir. Ancak ısı sıvalarının yalıtım malzemesi olarak adlandırılabilmesinin en temel koşulu da  $\lambda_{10} \leq 0.065$  W/mK temel değerini sağlamasıdır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı). Ülkemizde “ısı yalıtım sıvaları” ısı yalıtım pazarında önemli bir yer tutmakta ve Türkiye’de 50’den fazla üretici firma olduğu tahmin edilmektedir. Yaygın üretim, tüketim ve ihracat rakamlarına rağmen, ülkemizde, ısı yalıtım sıvaları konusunda yapılmış bilimsel çalışma sayısı ise çok kısıtlıdır.

Davraz vd. (2011), hafif agregalı köpük sıva konusunda bir araştırma yürütmüştür. Çalışmada 3 farklı pomza ve geliştirilmiş perlit hafif agrega olarak kullanılmıştır. Köpük sıva numunelerinde kuru yoğunluk 338-487 kg/m<sup>3</sup>, basınç dayanımı 0.64-2.34 MPa, eğilme dayanımı 0.070-0.11 MPa, kapiler su emme katsayısı 0.62-1.82 kg/m<sup>2</sup>.dak ve ısı iletkenlik katsayısı 0.068-0.088 W/mK arasında değiştiği belirtilmiştir.

Bu konuda ülkemizde yürütülen az sayıdaki bilimsel çalışmadan birisi Akbulut. (2018) tarafından yapılmıştır. Çalışmada yaygın kullanılan ve tamamı TS EN 998-1 standardına göre üretilen 5 farklı firmanın ürününden ısı yalıtım sıva numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri yanı sıra birim hacim kütle, kapiler su emme ve ısı iletkenlik katsayısı gibi fiziksel özellikleri incelenmiştir. Tez çalışmasında, örneklerin tamamının TS EN 998-1 standardı basınç dayanımı kriterini sağladığı (CS1 ya da CS2), kılcal su emme kriterini sadece 2 örneğin sağlayabildiği belirlenmiştir. Ayrıca, ısı iletkenlik özellikleri incelenen 5 örnekten 2’sinin TS 998-1 standardına göre T2 sınıfını ( $\lambda_{10} > 0.10$  W/mK) ancak

sağlayabildiği, bununla birlikte diğer 3 örneğin T1 sınıfında ( $\lambda_{10} \leq 0.10$  W/mK) yer aldığı ancak hiçbirisinin  $\lambda_{10} \leq 0.065$  W/mK temel koşulunu sağlayamadığı belirlenmiştir. Bir kısım üretici firma ürününde ısı iletkenlik beyan değerleri ile gerçek değerlerinin uyuşmadığı da ileri sürülmüştür.

Dylewski vd (2014) çalışmalarında bir binanın dış duvarlarında çimento sıva yerine ısı yalıtımlı bims granül veya EPS sıva kullanmanın faydalı olup olmadığı araştırmıştır. Binada kullanılan ısı kaynağına ve bir sıva tabakası olmayan bir duvarın parametrelerine bağlı olarak bu üç çeşit sıva için (Polonya koşullarında) ekolojik ve ekonomik analizleri yapmışlardır. Bims granül ve EPS sıvalı duvarların ısı yalıtım özelliklerinde bir iyileşme sağlandığı ve bunun sonucunda enerji tüketiminde tasarruf sağlandığını belirlemişlerdir. Bu etkinin bims ve EPS sıvada ısı kaynağına bağlı olarak 2-5 yılda gerçekleştiği, çimento sıva için bu sürenin 30 yılı aşığı iddia edilmiştir.

Barbero vd. (2014) araştırmalarında, mevcut ürünleri teknik ve ekonomik özelliklere göre karşılaştırarak, Avrupa pazarındaki ısı yalıtım sıvalarının genel bir analizini yapmışlardır. Araştırmanın temel amacı, ısı yalıtım sıvası alanındaki araştırmaları yenilikçi uygulamaya doğru yönlendirmek, gerçek pazar ve son kullanıcıların taleplerini karşılayabilecek yeni sıvalar oluşturmak olarak belirtilmiştir. Avrupa standartlarına göre tanımlanan üç ana faktörün, karışımın kuru hacim kütlesi, sertleşmiş sıvanın kuru yoğunluğu ve ısı iletkenlik olarak açıklanmıştır.

Zach vd. (2013) çalışmalarında, silika bazlı ultra hafif ısı yalıtım sıvalarının geliştirilmesine yönelik araştırma sonuçları açıklamıştır. Geliştirilen malzemelerin, yüksek açık gözeneklilik ve düşük birim hacim ağırlık nedeniyle, yapılar da ısı yalıtımı alanında önemli bir kullanım potansiyeline sahip olduğu ifade edilmiştir. Uygulamada bu malzemelerin temel gereklilikleri, kuru haldeki iletkenlik  $\lambda_{10,kuru} \leq 0.08$  W/mK, minimum basınç dayanımı  $f_c \geq 0.5$  N/mm<sup>2</sup> olarak açıklanmıştır.

Türkiye’de “ısı yalıtım sıvası” adı altında çok farklı marka ve türde ürün mevcuttur. Ancak bu ürünlerin büyük bölümünün özellikle ısı iletkenlik değeri açısından sorunlu olduğu da bilinmektedir. Bu çalışmada, yüksek performanslı, uzun servis ömürlü, ekonomik, kolay uygulanabilen ve uygulamada dübele gereksinim bırakmayan farklı bir yalıtım sıvasının geliştirilmesi amaçlanmış ve bu doğrultuda yürütülen deneysel çalışmaların bulguları sunulmuştur.

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

Bağlayıcı madde olarak CEM 42.5 R sınıfı Portland çimentosu, karışıma aderans kazandırmak için sönmüş toz kireç, köpük üretiminde sentetik köpük ajanı ve tüm karışım gruplarında 10 mm uzunluğunda polipropilen elyaf kullanılmıştır. Ayrıca geliştirilmiş perlit (-2 mm), kaplı perlit, cam küre (2-1 mm, stikloporas) ya da mikronize diyatomit, kontrol hariç tüm karışımlara ilave edilmiştir. Diyatomit, Denizli ili Sarayköy ilçesi civarındaki diyatomit ocaklarından temin edilmiştir. Kaplı perlit, geliştirilmiş perlite sodyum silikat emdirilip ısı işleme maruz bırakılarak laboratuvar da üretilmiştir. Karışım suyu olarak yerleşke şebeke suyu kullanılmıştır.

Araştırmada, 1 adedi hafif agregasız (kontrol) ve 4 farklı türde hafif agreganın 2 farklı oranda kullanıldığı toplam 9 adet çimento esaslı köpük sıva karışımı hazırlanmıştır. Hacim esasına dayalı karışım hesaplarında, bağlayıcı maddelerin özkütleri ( $\rho_r$ ), hafif agregaların etüv kurusu ( $\rho_{rd}$ ) ya da görünür tane yoğunlukları ( $\rho_a$ ) ve köpük litre ağırlığı ( $\rho_f$ ) dikkate alınmıştır. Doğal diyatomit, nem içeriğinin yüksek olması nedeniyle, %100 kuru duruma getirildikten sonra bilyalı değirmende öğütülmüş ve 150  $\mu$ m altına elenmiştir.

Kaplı perlit agregası eldesinde, öncelikle genişlemiş perlit 1 mm kare gözlü elekte elenmiş ve elek üstü bir kaptan toplanmıştır. Şebeke suyundan 1 birim ve 40 bome derecesine sahip sıvı sodyum silikattan da 1 birim olmak üzere, iki sıvı kütleye 0.1 g hassasiyetli elektronik terazi ile tartılıp karıştırılmıştır. Sonrasında kütleye 1 birim geliştirilmiş perlite 2 birim sıvı karışım ilave edilmiş ve 24 saat kapalı bir kaptan bekletilmiştir. 24 saat sonunda sıvı emdirilmiş perlit hava dolaşımı etüvde 200°C de değişmez kütleye kadar kurutulmuştur.

Sıva karışımlarına 80-90 g/L yoğunlukta köpük ilave edilmiştir. 50 litre suya 1 litre köpük ajanı ilave edilerek köpük jeneratörüne beslenmiştir. Köpük sıva harçlarında, karışıma giren bileşenler 0.1 g hassasiyetli elektronik terazi ile tartılmıştır. 50 lt lik bir kova içerisinde el mikseri ile önce harç kısmı karıştırılmış sonra köpük ilave edilmiş ve karıştırma işlemine 3-4 dak daha devam edilmiştir. Kıvam ve boşluklu birim hacim kütleye deneyleri sonrasında, taze harç 40x40x160 mm prizma ve  $\varnothing$ 50x130 mm silindir kalıplara dökülmüştür. Döküm işleminden 1 gün sonra kalıplar polietilen örtüler içerisinde alınmış, 20±3 °C’de 3 gün süreyle kalıpta bekletilmiştir. Kalıptan çıkarılan numuneler 20±3 °C ve %95 bağıl nem koşullarında 28.güne kadar iklim kabininde kürlenmiştir.

Çimento fiziksel ve kimyasal özellikleri üretici firma aylık üretim raporundan alınmıştır (Göлтаş, 2019). Kireç ve diyatomitin özkütlesi ( $\rho_r$ ) ile kaplı perlit ve cam kürenin görünür tane yoğunluğu ( $\rho_r$ ), Süleyman Demirel

Üniversitesi Doğal ve Endüstriyel AUM'nde (SDÜ DEYMAM) gaz piknometresi (Micrometrics-AccuPyc 1340) ile belirlenmiştir. Genleşmiş perlit tane yoğunluğu ve su emme oranı ile cam küre, kaplı perlit ve diyatomitin su emme oranları TS EN 1097-6 standardına göre belirlenmiştir. Taze harcın birim hacim kütesinin tayini deneyinde harç, ölçü kabına boşluk kalmayacak biçimde doldurulmuş ve yüzeyi düzeltilmiştir. Harçla doldurulmuş ölçü kabı toplam kütesi 1 g hassasiyetli terazi ile tartılmıştır. Taze harcın boşluklu birim hacim kütesi ( $\rho_m$ ) Eşitlik 1'de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır (TS EN 1015-6).

$$\rho_m = \frac{M_2 - M_1}{V_v} \quad (1)$$

Burada;  $\rho_m$ , taze harcın boşluklu birim hacim kütesi, kg/m<sup>3</sup>;  $M_1$ , ölçü kabının kütesi, g;  $M_2$ , taze harç dolu ölçü kabının kütesi, g;  $V_v$ , ölçü kabının hacmi, cm<sup>3</sup> dir. 28 günlük kür süresi sonrasında köpük sıva harcı numunelerine kuru birim hacim kütle, kılcal su emme, eğilme-basınç dayanımı ve ısıl iletkenlik deneyleri uygulanmıştır. Harç numunelerinin kuru birim hacim kütesini belirlemek için, TS EN 1015-10 standardına uygun olarak, numuneler sabit kütleyle ulaşıncaya kadar hava dolaşımli etüvde 70°C ± 3°C'de kurutulmuştur. Sonrasında 0.01 g duyarlığa sahip elektronik terazi ile her bir numunenin kütesi ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Daha sonra her bir numunenin eni (w), boyu (L) ve yüksekliği (h) 0.01 mm hassasiyetli elektronik kumpasla ölçülmüş ve hacmi hesaplanmıştır. Numune kuru birim hacim kütesi Eşitlik 2'de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$D_{kuru} = \frac{M_{s,kuru}}{V_s} \quad (2)$$

Burada;  $D_{kuru}$ , numunenin kuru durumda birim hacim kütesi, kg/m<sup>3</sup>;  $M_{s,kuru}$ , numunenin kuru durumdaki kütesi, g;  $V_s$ , numunenin hacmi, cm<sup>3</sup> dir. 6 adet prizma numunesi hesaplanan yoğunluğunun aritmetik ortalaması, numunenin kuru birim hacim kütesi olarak alınmıştır. Kuru durumdaki 40x40x160 mm boyutlarında 3'er adet prizma numune üzerinde TS EN 1015-18 standardına uygun olarak kapiler su emme deneyleri yürütülmüştür. Su içine yerleştirilen numunelerin kütleleri 10. ve 90. dak'nın sonunda ölçülmüştür. Numunelerin kılcal su emme katsayıları Eşitlik 3'de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$c = 0.1x(M_2 - M_1) \quad (3)$$

Burada;  $c$ , kapiler su emme katsayısı, kg/(m<sup>2</sup>. dak<sup>0.5</sup>);  $M_1$ , numunenin 10 dak sonra tartılan kütesi, g;  $M_2$ , numunenin 90 dak sonra tartılan kütesi, g'dır. Her bir sıva grubundan 3 adet numunenin kapiler su emme katsayısının aritmetik ortalaması, harç grubunun kapiler su emme katsayısı olarak kaydedilmiştir.

Köpük sıva numuneleri üzerinde, eğilmede çekme (3 noktadan yükleme) ve basınç dayanımı deneyleri TS EN 1015-11 standardına uygun olarak yürütülmüştür. 3 adet 40x40x160 mm boyutlarında prizma numuneler kullanılmıştır. Mesnetler arası mesafe, 100 mm dir. Numune grubunun eğilmede çekme dayanımı, 3 adet numunenin aritmetik ortalamasıdır. Eğilme yükü numunelerin üst yüzeyinin orta noktasından uygulanmış ve yüklemeye numune kırılıncaya kadar devam edilmiştir. Yükleme hızı 30 N/s olarak seçilmiştir. Numunelerin eğilmede çekme dayanımları Eşitlik 4'de verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_{cf} = 1.5 x \frac{F x L}{b x d^2} \quad (4)$$

Burada;  $f_{cf}$ , eğilmede çekme dayanımı, MPa;  $F$ , en büyük yük, N;  $L$ , mesnet silindirleri arasındaki açıklık, mm;  $b$  ve  $d$ , numunenin en kesit boyları, mm'dir. Aynı numune gruplarından 40x40x160 mm boyutlarında 6 adet prizma numune üzerinde basınç dayanımı deneyi yürütülmüştür. Bu deney için eğilmede çekme-basınç dayanımı deneyinde kullanılan test cihazının basınç dayanımı test bölümü kullanılmıştır. Prizma kalıptan çıkan kenarı, pres başlıkları veya yükleme başlıklarının en yakın kenarından 16 mm ±0,1 mm uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yükleme hızı TS EN 1015-11 standardına uygun olarak 250 N/s olarak seçilmiştir. Köpük sıva numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları Eşitlik 5'de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5)$$

Burada;  $f_c$ , basınç dayanımı, MPa;  $F$ , kırılma yükü, N;  $A_c$ , numunenin yük doğrultusundaki kesit alanı, mm<sup>2</sup>'dir. 55 mm çapında 130 mm yüksekliğinde silindirik köpük sıva numunelerinden 3'er adet 25 mm yüksekliğinde parçalar kesilmiş ve yüzeyleri zımpara ile düzeltilmiştir. Bu numune bölümleri üzerinde TS EN 12667 standardına uygun olarak ısıl iletkenlik katsayısı ölçümleri, SDÜ DEYMAM'nde ısı akısı ölçme yöntemi prensibine göre ölçüm yapan Lasercomp Fox50 ısıl iletkenlik test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Isıl iletkenlik ölçümleri öncesinde numuneler hava dolaşımli etüvde 70°C 'de değişmez kütleyle kadar kurutulmuştur. Test cihazının sıcak ve soğuk plakaları arasında sıcaklık farkı (dT) 10 K olarak ayarlanmıştır.

Köpük sıva numunelerinde bağlayıcı madde olarak kullanılan CEM I 42.5 R sınıfı Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Çimento özellikleri (The properties of cement) (Göldaş, 2019)

Çimento Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri			
Bileşenler (%)	%	Fiziksel ve Mekanik Özellikler	
SiO <sub>2</sub>	20.52	Hacimsel Genleşme (mm)	1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.00	İncelik (90µ)	0.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.45	İncelik (200µ)	1.10
CaO	64.28	Özgül Yüzey Alanı (cm <sup>2</sup> /g)	4010
MgO	1.63	Priz Başlangıcı (dak)	160
SO <sub>3</sub>	2.53	Priz Sonu (dak)	210
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	0.71	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3.14
CaO (Serbest)	1.81	Basınç Dayanımı (2 günlük, MPa)	24.2
K.K.	2.72	Basınç Dayanımı (28 günlük, MPa)	51.5
Diğer	%	Klinker	%
Cl <sup>-</sup> (%)	0.005	C <sub>3</sub> S	53.40
Ç.K.	0.58	C <sub>2</sub> S	16.64
A.E.	0.61	C <sub>3</sub> A	5.48
		C <sub>4</sub> AF	10.4

### 3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Köpük harç bileşenlerinde hafif agrega olarak kullanılan genişmiş perlit ve diyatomitin kimyasal özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Hafif agregaların oksit bileşenleri GÖLTAŞ A.Ş. Kalite Kontrol Laboratuvarı’nda X-Işını Floresans spektrometresi (XRF) ile yapılmıştır.

**Tablo 2.** Genleştirilmiş perlit ve diyatomitin kimyasal özellikleri (The chemical properties of expanded perlite and diatomite)

Malzeme Adı	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	K. Kaybı (%)
Genleştirilmiş Perlit	75.09	13.22	0.61	0.61	0.23	3.13	4.81	0.003	1.20
Diyatomit	79.01	2.77	2.14	3.07	2.88	0.19	0.68	0.78	7.73

SDU DEYMAM’nde gaz piknometresi ile; diyatomit özkütlesi 2.27 g/cm<sup>3</sup>, kirecin özkütlesi 2.47 g/cm<sup>3</sup>, genişmiş perlit-kaplı perlit ve hafif cam kürenin görünür tane yoğunlukları ise sırasıyla 0.883, 0.934 ve 0.997 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. TS EN 1097-6 standardına göre genişmiş perlitin, kaplı perlitin ve hafif cam kürenin 24 saatlik kütlece su emme oranları sırasıyla % 125, % 67 ve % 18 olarak belirlenmiştir.

Tüm karışım tasarımlarında Portland çimentosuna ilave olarak, sıva harcına aderans kazandırma amacıyla çimento kütlelerinin % 40’ı oranında sönmüş (toz) kireç kullanılmıştır. Kontrol karışımı (K) hariç her grupta toplam bağlayıcı miktarı (çimento+kireç) 25 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> azaltılmış, karışımlara azaltılan miktarlarda hafif agrega türünden birisi ilave edilmiştir. Tüm harç karışımlarına çimento kütlelerini %0.5’i oranında polipropilen elyaf (15 mm) ilave edilmiş, s/b oranları (0.5) sabit tutulmuştur. Karışımların teorik kuru birim hacim kütleleri 250 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Köpük sıva harçlarının karışım tasarımları Tablo 3’de verilmiştir.

28 günlük kür süresini tamamlayan bir gruptan 6 adet köpük sıva prizma numunesi, TS EN 1015-10 standardına uygun olarak 70°C de değişmez kütleye kadar hava dolaşımı etüvde kurutulmuştur. Kurutulan numuneleri boyutları 0.01 mm hassasiyetle elektronik kumpasla ölçülmüş ve 0.01 g hassasiyetli elektronik terazide kütleleri tartılmıştır. Daha sonra numunelerin kuru birim hacim kütleleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 1’de verilmiştir

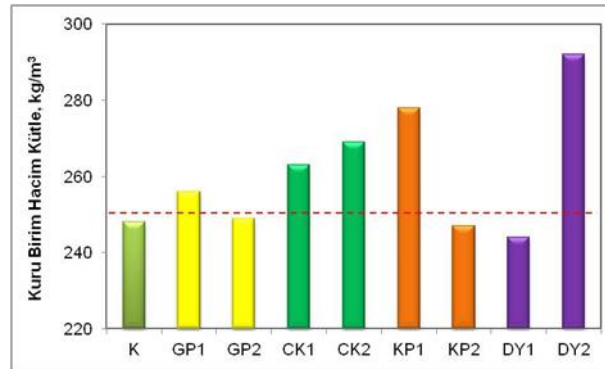


**Tablo 3.** Çimento esaslı köpük sıva numunelerinin karışım tasarımları (The mix designs of foam plaster specimens based cement)

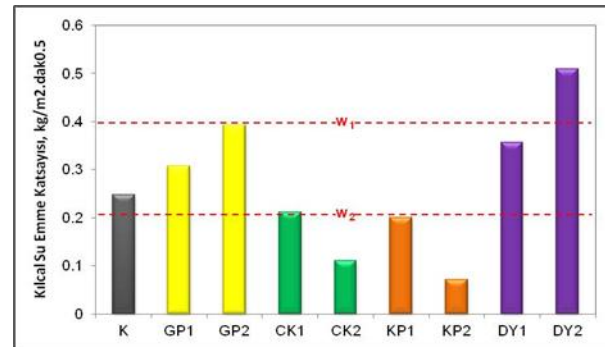
Numune No	Çimento (kg)	Kireç (kg)	LWA (kg)	Fiber (kg)	Su (kg)	Köpük (kg)	s/b	s/k	D <sub>12</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>14</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
K	178.0	71.2	0	1.25	124.6	67.0	0.5	0.50	442	252
GP1	160.0	64.0	25.0	1.12	112.0	58.2	0.5	0.45	420	251
GP2	143.0	57.2	50.0	1.00	100.1	49.3	0.5	0.40	401	252
CK1	160.0	64.0	25.0	1.12	112.0	61.7	0.5	0.45	424	251
CK2	143.0	57.2	50.0	1.00	100.1	49.3	0.5	0.40	408	252
KP1	160.0	64.0	25.0	1.12	112.0	61.7	0.5	0.45	425	251
KP2	143.0	57.2	50.0	1.00	100.1	49.3	0.5	0.40	410	252
DY1	160.0	64.0	25.0	1.12	112.0	68.0	0.5	0.45	430	251
DY2	143.0	57.2	50.0	1.00	100.1	48.8	0.5	0.40	420	252

LWA : Hafif agrega      D<sub>12</sub> : Teorik taze yoğunluk  
 K : Kontrol harcı      GP : Genleşmiş perlitli köpük sıva  
 CK : Cam agregalı köpük sıva      DY : Diyatomitli köpük sıva  
 1 : Kütlece %20 LWA'lı köpük sıva      2 : Kütlece %40 LWA'lı köpük sıva

Çalışmada 250 kg/m<sup>3</sup> ve daha düşük kuru birim hacim kütle hedefine, 9 farklı köpük sıva karışımı tasarımından ancak 4 adedi (K, GP2, KP2 ve DY1) ile ulaşılabilmektedir. Bununla birlikte GP1'in kuru birim hacim kütlesi de hedeflenen değere oldukça yakındır (256 kg/m<sup>3</sup>).

**Şekil 1.** Köpük sıva numunelerinin kuru birim hacim kütlelerinin karşılaştırılması (The unit volume per masses of foam plaster specimens)

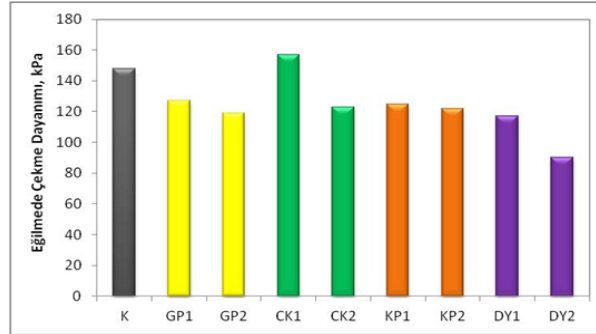
Köpük sıva numunelerin kılcıl (kapiler) su emme değerleri TS EN 1015-18 standardına uygun olarak belirlenmiş ve bulgular Şekil 2'de verilmiştir.

**Şekil 2.** Köpük sıva numuneleri kılcıl su emme katsayılarının karşılaştırılması (The capillary water absorption of foam plaster specimens)

TS EN 998-1 standardına göre, CK2, KP1 ve KP2 numuneleri W<sub>2</sub> sınıfına, K, CK1, GP1, GP2 ve DY1 numuneleri W<sub>1</sub> sınıfına girmektedir (Şekil 2). Bununla birlikte, köpük sıva harcı bileşiminde herhangi bir su itici katkı maddesi kullanılmadığı dikkate alındığında, köpük sıva numunelerinin kılcıl su emme katsayılarının nispeten düşük

olduğunu söylemek mümkündür. Bu durum köpük sıva içerisinde ortalama çapı 100  $\mu\text{m}$  civarındaki hava küreciklerinin kapiler kanalcıkları tıkamasıyla ilişkilendirilmiştir.

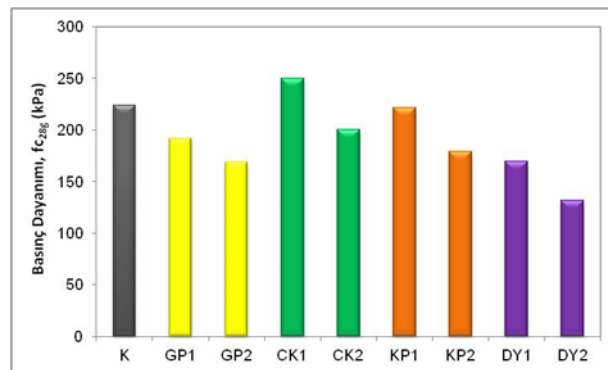
Isı yalıtım sıvalarında eğilme dayanımı önemli bir mekanik özelliktir. 28 günlük kür süresini tamamlamış ve değişmez kütleye kadar kurutulmuş her bir köpük sıva grubundan 3 adet prizma üzerinde eğilme dayanımı deneyleri yürütülmüş ve bulgular Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Köpük sıva numuneleri eğilme dayanımlarının karşılaştırılması (The bending strengths of foam plaster specimens)

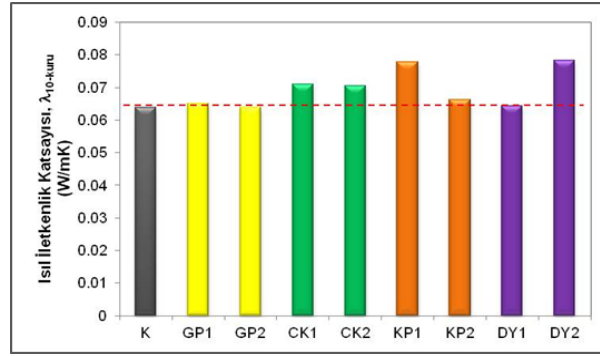
En yüksek eğilme dayanımı değerini CK1 (157 kPa) sergilemiştir. Kontrol numunesi dayanımı da CK1 numunesine (148 kPa) yakın bir eğilme dayanımına sahiptir. CK1 numunesinin, nispeten daha yüksek eğilme dayanımı sergilemesi, karışıma ilave edilen cam kürecik ile ilişkilendirilmiştir. Ancak cam küre içeriği arttıkça eğilme dayanımı %22 civarında azalmıştır. Bu durum, köpük sıvada eğilme dayanımının kullanılan agrega türünden daha çok matrisi oluşturan köpük harcının sorumlu olduğunu, kullanılan agrega tane boyutu azaldıkça eğilme dayanımının düşebileceğini göstermektedir. İlave olarak, en düşük eğilme dayanımı değerlerinin DY numunelerinde sergilenmiş olması, doğal diatomitin yüksek miktarda kil içermesiyle ilişkilendirilmiştir.

Basınç dayanımı deneyleri 6 adet tam prizma üzerinde yürütülmüştür. 28 günlük kür süresini tamamlamış ve değişmez kütleye kadar kurutulmuş prizma numunelerinde, 6 adet prizma numunesinin aritmetik ortalaması basınç dayanımı olarak alınmıştır. Kütlece %10 oranında cam küre kullanımı (CK1) köpük sıva numunesinin basınç dayanımını ~%12 oranında artırmıştır. %10 civarında kaplı perlit kullanımında (KP1) ise kontrol numunesine göre basınç dayanımı yaklaşık aynıdır. %10 oranında genişmiş perlit kullanımında (GP1) dayanım %14, %20 oranında (GP2) ise %25 civarında azalmıştır. Diatomit de ise %10 kullanımında (DY1) %24, %20 kullanımında (DY2) ise %40 civarında dayanım kaybı gözlenmiştir (Şekil 4). Hiçbir numunede hedeflenen  $\geq 500$  kPa basınç dayanım değerine ulaşamamıştır, TS EN 998-1 standardında en düşük dayanım sınıfı olarak belirtilen CS1 (0.4-2.5 MPa) koşulu sağlanamamıştır. Bu durum numunelerin nispeten düşük birim hacim kütleleri ile ilişkilendirilmiştir.



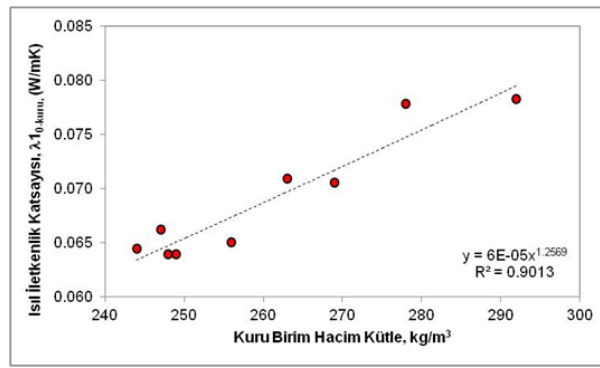
Şekil 4. Köpük sıva numuneleri basınç dayanımlarının karşılaştırılması (The compressive strengths of foam plaster specimens)

Köpük sıva numunelerinin, TS EN 12667 standardına uygun olarak Lasercomp Fox 50 cihazı ile ölçülen ısı iletkenlik katsayıları ( $\lambda_{10}$ ) Şekil 5'de verilmiştir. Köpük sıva numunelerinin ısı iletkenlik sınırı, ısı yalıtım malzemeleri için kabul edilen ( $\lambda_{10-kuru}$ )  $\leq 0.065$  W/mK olarak belirlenmiştir. Bu koşulu 4 adet köpük sıva numunesi sağlarken (K, GP1, GP2 ve DY1), diğerlerinin ısı iletkenlik katsayıları sınır değer üstündedir. Bununla beraber TS EN 998-1 standardında (T1 sınıfı) ısı yalıtım sıvaları için belirlenen 0.10 W/mK üst sınırını tüm numuneler sağlamıştır.



Şekil 5. Köpük sıva numunelerinin ısı iletkenlik katsayılarının karşılaştırılması (The thermal conductivity coefficients of foam plaster specimens)

Ölçüm bulguları, köpük sıva numunelerinin ısı iletkenlik katsayılarının ( $\lambda_{10-kuru}$ ) kullanılan hafif agrega türünden daha çok kuru birim hacim kütleleri ( $\rho_m$ ) ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma kapsamında üretilen köpük sıva numunelerinde,  $\lambda_{10-kuru} - \rho_m$  ilişkisi Şekil 6' da incelenmiştir.



Şekil 6. Köpük sıva numunelerinde  $\lambda_{10-kuru} - \rho_m$  ilişkisi ( $\lambda_{10-kuru} - \rho_m$  relationship in foam plaster specimens)

Çalışma kapsamındaki köpük sıva numunelerinde  $\lambda_{10-kuru} - \rho_m$  arasındaki Eşitlik 6'da tanımlanmıştır.

$$\lambda_{10-kuru} = 6 \times 10^{-5} x \rho_m^{1.257} \quad (R^2 = 0.90) \quad (6)$$

Çimento esaslı köpük sıvaların (K ya da GP1) ısı bölgelerine göre uygulama kalınlıklarının belirlenebilmesi için 19 cm kalınlığında, 600 kg/m<sup>3</sup> brüt yoğunlukta yatay delikli tuğla duvar dolgu elemanı olarak seçilmiştir. Tuğla duvarın tasarım ısı iletkenlik katsayısı ( $\lambda_h$ ) olarak standartta (TS 825,EK E, Madde 7.1.5) belirtilen 0.33 W/mK değeri esas alınmıştır. TS 825 standardında ısı bölgelerine göre dış duvarlar için ısı geçiş katsayıları ( $U_D$ ); I. Isı bölgesi için  $\leq 0.70$  W/m<sup>2</sup>K, II. Isı bölgesi için  $\leq 0.60$  W/m<sup>2</sup>K, III. Isı bölgesi için  $\leq 0.50$  W/m<sup>2</sup>K, IV. Isı bölgesi için  $U_D \leq 0.40$  W/m<sup>2</sup>K dir. Yukarıda belirtilen  $U_D$  katsayısı dikkate alınarak, tüm ısı bölgeleri için köpük sıva uygulama kalınlıkları hesaplanmış, (I. Isı bölgesi için) örnek çözüm Tablo 4'de verilmiştir. Yeni inşa edilen bir bina için köpük sıvanın iç ve dış duvarda uygulanması durumunda en az kalınlıklar, I. ısı bölgesi için 2.5 cm+2.0 cm, II. ısı bölgesinde 3.0 cm+3.0 cm, III. ısı bölgesinde 4.0 cm+4.0 cm ve IV. ısı bölgesinde ise 6.0 cm+5.5 cm'dir. Kalınlık arttıkça, sıvanın duvar yüzeyine tutunması gibi güçlükler ile karşılaşılması mümkündür. Bu bakımdan köpük sıvanın ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilmesi, özellikle III. ve IV. ısı bölgelerinde iç ve dış sıva olarak birlikte uygulanabilmesine bağlıdır.

4 farklı ısı bölgesi için uygulama kalınlıklarına bağlı olarak (K ve GP1 tipi) köpük sıvaların birim fiyat analizleri Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir. Analizde, Nisan 2019 yılı hammadde birim fiyatları esas alınmıştır. Hammadde maliyetleri %25 oranında artırılarak diğer girdiler (işçilik, enerji, kar vd.) birim fiyatlara ilave edilmiştir. Sonrasında ısı bölgelerine göre minimum uygulama kalınlıklarına göre 1 m<sup>2</sup> birim fiyatı hesaplanmıştır (Tablo 5 ve 6). Isı bölgelerine göre K tipi köpük sıvanın birim fiyatı ~5 - 13 TL/m<sup>2</sup>, GP1 tipi köpük sıvanın ise ~6.5-16.5 TL/m<sup>2</sup> aralığında değişmektedir. Geleneksel yalıtım malzemeleri ve mantolamada kullanılan diğer malzemelerin güncel birim fiyatları da Tablo 7'de verilmiştir.

**Tablo 4. I.** Isı bölgesi için köpük sıva uygulama kalınlığı hesabı (The calculation of foam plaster application thickness for climate zone I)

Kesitteki Yapı Bileşenleri	Yapı Elemanı Kalınlığı, d (m)	Isıl İletkenlik Hesap Değeri, $\lambda_h$ (W/mK)	d/ $\lambda$ 1/ $\alpha$ (m <sup>2</sup> K/W)	Isıl Geçirgenlik Katsayısı, U (W/m <sup>2</sup> K)
1/ $\alpha_1$ 1	-	-	0.13	
Köpük Sıva 2	0.025	0.064	0.391	
I. Yatay Delikli Tuğla 3	0.19	0.330	0.576	
Köpük Sıva 2	0.020	0.064	0.313	
1/ $\alpha_4$ 1	-	-	0.040	
<b>TOPLAM</b>			<b>1.449</b>	<b>0.69</b>
<sup>1</sup> TS 825 Çizelge 2		<sup>2</sup> SDU DEYAMAM Isıl İletkenlik analiz sonucu		
<sup>3</sup> TS 825, EK E, Madde 7.1.5				

**Tablo 5.** Isı bölgelerine göre “K tipi” köpük sıva birim maliyetleri (The unit cost of “K type” foam plaster according to climate zone)

Hammadde	Miktar (kg/m <sup>3</sup> )	Fiyat (₺)	TUTAR (₺)
Çimento	178	0.18	32.04
Kireç	71.2	0.12	8.64
LWA	0	1.50	0.00
Elyaf	1.12	6.00	7.50
Köpük Ajanı	1.75	20.00	40.00
1 m <sup>3</sup> Köpük Sıva Hammadde Maliyeti (₺/m <sup>3</sup> )			88.18
Diğer Maliyetler (İşçilik, enerji, nakliye, kar vd.) (₺/m <sup>3</sup> )			22.05
1 m <sup>3</sup> Köpük Sıva Birim Fiyatı (Tahmini) (₺/m <sup>3</sup> )			110.23
Kalınlık 4.5 cm (I. Bölge) (₺/m <sup>2</sup> )			4.96
Kalınlık 6 cm (II. Bölge) (₺/m <sup>2</sup> )			6.61
Kalınlık 8 cm (II. Bölge) (₺/m <sup>2</sup> )			8.82
Kalınlık 11.5 cm (IV. Bölge) (₺/m <sup>2</sup> )			12.68

**Tablo 6.** Isı bölgelerine göre “GP1 tipi” köpük sıva birim maliyetleri (The unit cost of “GP1 type” foam plaster according to climate zone)

Hammadde	Miktar (kg/m <sup>3</sup> )	Fiyat (TL)	TUTAR (TL)
Çimento	160	0.18	28.80
Kireç	64	0.12	7.68
LWA	25	1.50	37.50
Elyaf	1.12	6.00	6.72
Köpük Ajanı	1.75	20.00	35.00
1 m <sup>3</sup> Köpük Sıva Hammadde Maliyeti (TL/m <sup>3</sup> )			115.70
Diğer Maliyetler (İşçilik, enerji, nakliye, kar vd.) (TL/m <sup>3</sup> )			28.93
1 m <sup>3</sup> Köpük Sıva Birim Fiyatı (Tahmini) (TL/m <sup>3</sup> )			144.63
Kalınlık 4.5 cm (I. Bölge) (TL/m <sup>2</sup> )			6.51
Kalınlık 6 cm (II. Bölge) (TL/m <sup>2</sup> )			8.68
Kalınlık 8 cm (II. Bölge) (TL/m <sup>2</sup> )			11.57
Kalınlık 11.5 cm (IV. Bölge) (TL/m <sup>2</sup> )			16.63

**Tablo 7.** Geleneksel mantolama ve yardımcı malzemeleri 2019 yılı birim fiyatları (Unit price of traditional thermal insulation and supplementary materials for 2019)

Malzeme	Birim fiyat (KDV'li)
EPS (16 dansite, karbonlu)	672 TL/m <sup>3</sup>
XPS (40 dansite)	785 TL/m <sup>3</sup>
Taşıyıcı Levha (150 dansite)	1025 TL/m <sup>3</sup>
Yapıştırma harcı (4 kg/m <sup>2</sup> )	1.3 TL/m <sup>2</sup>
Donatı filesi (160 g/mtül)	6 TL/m <sup>2</sup>
Dübel (10 cm, 6 adet/m <sup>2</sup> )	1.7 TL/m <sup>2</sup>
Sıva harcı (5 kg/m <sup>2</sup> )	8.5 TL/m <sup>2</sup>

Geleneksel mantolama malzemeleri (EPS, XPS ve taşıyıcı levha) ile köpük sıvanın aynı ısı bölgeleri için  $U_D$  değerlerini sağlayacak kalınlıklar hesaplanmıştır. Tüm ısı bölgeleri için, 19 cm yatay delikli tuğla duvar için  $U_D$  değerlerini sağlayan (GP1) tipi köpük sıvanın  $U$  değerleri Eşitlik 7 ve Eşitlik 8'deki bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Burada;  $U$ ; ısı geçiş katsayısı, W/m<sup>2</sup>K;  $R$ , ısı direnci, m<sup>2</sup>K/W. GP 1 tipi köpük sıva için hesaplanan  $U$  değeri sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

$$R = \frac{\lambda_{10}}{d} \quad (7)$$

$$U = \frac{1}{R} \quad (8)$$

**Tablo 8.** GP1 tipi köpük sıvanın ısı bölgelerine göre d ve U değerleri (The “U and d” values of GP 1 type plaster according to climate zone)

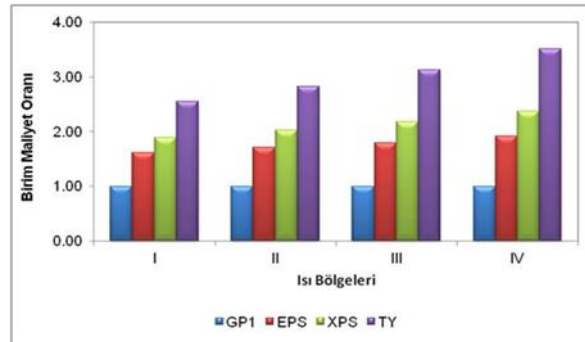
Isı Bölgesi	d, (m)	$\lambda_{10}$ , (W/mK)	R, (m <sup>2</sup> K/W)	U, (W/m <sup>2</sup> K)
I	0.045	0.064	0.70	1.42
II	0.060	0.064	0.94	1.07
III	0.080	0.064	1.25	0.80
IV	0.115	0.064	1.80	0.56

*R; Isıl direnç, U; Isıl geçiş katsayısı*

Hesaplanan U değerleri esas alınarak EPS, XPS ve taşıyıcı levha eşdeğer kalınlıkları ( $d_{es}$ ) Eşitlik 9'daki bağıntı kullanılarak belirlenmiştir.

$$d_{es} = \frac{\lambda_{10}}{U} \quad (9)$$

Burada;  $d_{es}$ , ilgili ısı bölgesi için U değerini sağlayan yalıtım malzemesi kalınlığıdır, m, dir. Tablo 7'de verilen birim fiyatlar ve ısı yalıtım malzemelerinin hesaplanan eşdeğer kalınlıkları (Tablo 8) esas alınarak, ısı yalıtım malzemelerinin ısı bölgelerine göre karşılaştırmalı birim maliyet oranları Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, GP1 tipi köpük sıvaya göre geleneksel yalıtım malzemeleri; I. ısı bölgesi için 1.6-2.5 kat, II. ısı bölgesi için 1.7-2.8 kat, III. ısı bölgesi için 1.8-3.1 kat, IV. ısı bölgesi için 1.9-3.5 kat daha ekonomiktir.

**Şekil 7.** Isı bölgeleri ve eşdeğer kalınlıklara göre ısı yalıtım malzemeleri birim maliyet oranları (The unit cost rates of thermal insulation materials according to climate zone and equivalent thickness)

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

Çalışma boyunca yürütülen deney ve analizlerden elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

- ✓ Taze köpük sıva harcının gerçek yoğunluk değerlerinin belirlenmesi sonucunda, CK1, CK2, KP1 ve DY2 numunelerinde teorik olarak hesaplanan yoğunluk değerlerinde ~40-60 kg/m<sup>3</sup> sapma olmuştur.
- ✓ 250 kg/m<sup>3</sup> kuru birim hacim kütle değerlerine, K, GP2, KP2 ve DY1 örneklerinde ulaşılmış, GP1 örneğinde de oldukça yakın (256 kg/m<sup>3</sup>) değerler elde edilmiştir.
- ✓ En yüksek eğilme dayanımını CK1 (157 kPa) sergilemiştir. K numunesi, CK1 numunesine (148 kPa) yakın bir eğilme dayanımına sahiptir. CK1 numunesinin, nispeten daha yüksek eğilme dayanımı sergilemesi, cam küreciğin harç içerisinde hacimde daha az yer işgal etmesiyle ilişkilendirilmiştir. %20 cam küre içeren numunenin (CK2) eğilme dayanımı %22 civarında azalmıştır. Bu olgu eğilme dayanımında, agrega türünden daha çok matrisi oluşturan harcın sorumlu olduğunu, karışımdaki hafif agrega hacmi arttıkça eğilme dayanımının azalabileceğini göstermiştir. İlave olarak, en düşük eğilme dayanımını DY numunelerinin sergilemesi, yüksek özgül yüzey alanına ve yüksek miktarda kil içeriğine bağlıdır.
- ✓ Kütlece %10 oranında cam küre kullanımı (CK1) basınç dayanımını ~%12 oranında artırmıştır. %10 civarında kaplı perlit kullanımında (KP1) ise kontrol numunesine göre basınç dayanımı yaklaşık aynıdır. %10 oranında genişmiş perlit kullanımında (GP1) dayanım %14, %20 oranında (GP2) ise %25 civarında azalmıştır. %10 oranında diatomit kullanımında (DY1) %24, %20 oranında (DY2) ise %40 dayanım kaybı gözlenmiştir.
- ✓ Hedeflenen  $\geq 500$  kPa basınç dayanım değerine hiçbir numunede ulaşılamamış, TS EN 998-1 standardında alt sınır olan CS1 (0.4-2.5 MPa) koşulu sağlanamamıştır.
- ✓ Isıl iletkenlikte öngörülen ( $\lambda_{10-kuru}$ )  $\leq 0.065$  W/mK sınır değeri K, GP1, GP2 ve DY1 numunelerinde sağlanmış, diğerlerinde öngörülen sınır değer üstünde kalmıştır.



- ✓ Köpük sıva numunelerinin ısı iletkenlik katsayılarının ( $\lambda_{10-kuru}$ ) kullanılan hafif agrega türünden daha çok, kuru birim hacim kütleleri ( $\rho_m$ ) ile yakından ilişkili olduğunu ortaya konulmuş, bu ilişki Eşitlik 6'da verilen bağıntı ile tanımlanmıştır.
- ✓ Yeni inşa edilen bir binada köpük sıvanın iç ve dış duvarda uygulanması durumunda en az uygulama kalınlıkları I. ısı bölgesi için 2.5 +2.0 cm, II. ısı bölgesinde 3.0+3.0 cm, III. ısı bölgesinde 4.0+4.0 cm ve IV. ısı bölgesinde ise 6.0+5.5 cm olarak belirlenmiştir.
- ✓ Isı bölgelerine göre K tipi köpük sıvanın (tahmini) birim fiyatı ~5-13 TL/m<sup>2</sup>, GP1 tipi köpük sıvanın ise ~6.5-16.5 TL/m<sup>2</sup> aralığında hesaplanmıştır.
- ✓ Köpük sıvanın ısı bölgelerine göre belirlenen U değerleri esas alınarak, EPS, XPS ve taş yünü levhanın eşdeğer kalınlıkları hesaplanmış, birim fiyatlar ve hesaplanan eşdeğer kalınlıklar kullanılarak, ısı yalıtım malzemelerinin farklı ısı bölgeleri için birim maliyetleri karşılaştırılmıştır. K tipine göre daha yüksek birim maliyete sahip olan GP1 tipi köpük sıvanın birim maliyeti ~145 TL/m<sup>3</sup> tür. İşçilik hariç, uygulama birim fiyatları ise I., II., III. ve IV. ısı bölgelerinde sırasıyla 21, 23, 26, 31 TL/m<sup>2</sup> dir. GP1 tipi köpük sıva ile karşılaştırıldığında, geleneksel yalıtım malzemeleri; I. ısı bölgesi için 1.6-2.5 kat, II. ısı bölgesi için 1.7-2.8 kat, III. ısı bölgesi için 1.8-3.1 kat, IV. ısı bölgesi için 1.9-3.5 kat, daha pahalıdır.

Çimento esaslı köpük sıvanın hammaddeleri bol ve geleneksel yalıtım malzemelerine göre çok daha ekonomiktir. Ayrıca kullanılan tüm hammaddeleri yerli kaynaklara dayanmaktadır. Ülkemizin tüm ısı bölgelerinde bu hammaddeler kolaylıkla temin edilebilir. Ayrıca polipropilen elyaf hariç bileşiminde organik bir malzeme içermemesi ve elyaf oranının da (kütlece %0.5) çok düşük olması, çimento esaslı köpük sıvanın A1 sınıfı yanmaz malzeme kategorisinde yer alması için yeterlidir. Bu durum çimento esaslı köpük sıvayı, taş yünü/camyünü ve mineral esaslı diğer dış cephe mantolama malzemelerine de önemli bir alternatif yapmaktadır.

### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma TÜBİTAK 118M091 nolu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir. Yazarlar TÜBİTAK'a desteklerinden dolayı teşekkür ederler.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

### Kaynaklar (References)

- Akbulut M., 2018. Hazır Isı Yalıtım Sıvalarının Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Uygunluk Değerlendirmesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Barbero S., Marco Dutto M., Ferrua C., Pereno A., 2014. Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison, Energy and Buildings 77 (2014) 40-47.
- Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete, Sayı 26735, 19 Aralık 2007.
- Davraz M, Gündüz L, Başpınar E., 2011. Lightweight Aggregated Foam Plaster for Thermal Insulation in Buildings, Journal of Engineering Science and Design, Vol:1 No:3 pp.150-155, 2011
- Dylewski R., Adamczyk J., 2014. The comparison of thermal insulation types of plaster with cement plaster, Journal of Cleaner Production, 83 (2014) 256-262.
- GÖLTAŞ AŞ, 2019. Şubat Ayı Çimento Kalite Kontrol Raporu, Isparta.
- Mercan, H., 2016. Yalıtım Sektöründe Pazar Araştırması ve Pazarlama Stratejilerinin İncelenmesi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Türkiye İMSAD Yapı Sektörü 2017 Raporu -Yalıtım Malzemeleri, 2018.
- Isı Yalıtımı Yol Haritası. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/ustmenu/ustmenu1009.pdf> Erişim:08.05.2019
- Ünal Ö., TMMOB Makine Mühendisleri Odası Ankara Şubesi Enerji Komisyonu [https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi\\_dosya\\_ekleri/0f0c65cbf947d1c\\_ek.pdf](https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi_dosya_ekleri/0f0c65cbf947d1c_ek.pdf)
- Yaman Ö., Şengül Ö., Selçuk H., Çalikuş O., Kara İ., Erdem Ş., Özgür D., (İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu), 2015. Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı 60 - 487.
- XPS Türkiye, 2019. <http://www.xpsturkiye.org/sayfa.asp?ID=132>
- Zach J., Hela R., Sedlmajer M., Hroudova J., 2013. Development of Thermal Insulation Plasters for Insulating and Sanitation of Building Constructions, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 5, No. 3, June 2013
- TS 825. Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, TSE, Ankara, 2008.
- TS EN 1015-1. Kâgir harcı - Deney yöntemleri - Bölüm 18: Sertleşmiş harcın kapiler etkiden kaynaklanan su emme katsayısının tayini, TSE, Ankara, 2004.
- TS EN 1015-6. Kâgir harcı - Deney metotları - Bölüm 6: Taze harcın boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini, TSE, Ankara, 2000.
- TS EN 1015-10. Kâgir harcı-Deney metotları- Bölüm 10: Sertleşmiş harcın boşluklu kuru birim hacim kütlelerinin tayini, TSE, Ankara, 2001.

- TS EN 1015-18. Kâgir harcı - Deney yöntemleri - Bölüm 18: Sertleşmiş harcın kapiler etkiden kaynaklanan su emme katsayısının tayini, TSE, Ankara, 2004.
- TS EN 1097-6. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, TSE, Ankara, 2002.
- TS EN 12667. Yapı malzemeleri ve mamullerinin ısıl performansı-Mahfazalı sıcak plaka ve ısı akış sayacı metotlarıyla ısıl direncin tayini-Yüksek ve orta ısıl dirençli mamuller, TSE, Ankara, 2003.



## EVALUATION OF TWO DIFFERENT WOOD TYPES IN TERMS OF DURABILITY AND TREATABILITY

Barış GÜNEŞ\*

Istanbul University-Cerrahpasa, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Istanbul, Turkey

### Keywords

Wood,  
Bangkirai,  
Iroko,  
Durability,  
Treatability.

### Abstract

The selection of an appropriate wood type as a structural material mainly depends on the environmental conditions of a region, such as humidity and temperature. Besides, the availability of the material with a reasonable cost is another concern in the selection. In this study, replaceability of “bangkirai” type of wood with “iroko” type of wood is investigated in terms of durability and treatability. The need for this study is aroused from the lack of “bangkirai” wood to satisfy the necessary conditions aforementioned above in the construction of visitor’s platform of Göbeklitepe Roof Canopy Structure. Göbeklitepe, which is known as the world’s first temple, is located in 18 km distance to the city of Şanlıurfa, Turkey. A visitor’s platform is planned to be built on this area in order to present the findings, the archaeological remains and the architecture to the society. The plank flooring material used on various parts of the visitor’s platform of this roof canopy structure is specified as “bangkirai” type of wood in the technical specification of the project. This study aims to reveal if it is convenient and suitable to use “iroko” type of wood instead of “bangkirai” type of wood on the related parts of platform.

## İKİ FARKLI AHŞAP TÜRÜNÜN DURABİLİTE VE EMPRENYE EDİLEBİLİRLİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

### Anahtar Kelimeler

Ahşap,  
Bangkirai,  
Iroko,  
Durabilite,  
Emprenye Edilebilirlik.

### Öz

Yapısal malzeme olarak uygun bir ahşap türünün seçimi, öncelikle nem ve sıcaklık gibi bölgenin çevresel koşullarına bağlıdır. Bunun yanında, malzemenin ekonomik olarak bulunabilirliği de seçimi etkileyen bir diğer etmendir. Bu çalışmada, “iroko” türü bir ahşabın, “bangkirai” türü bir ahşap yerine kullanılıp kullanılmayacağı, durabilite ve empenye edilebilirlik açısından irdelenmiştir. Bu çalışmaya, Göbeklitepe’de bulunan çatı kanopi yapısının ziyaretçi platformu kısmında kullanılan “bangkirai” ahşabının yukarıda bahsedilen şartları sağlama zorlukları bulunduğundan dolayı ihtiyaç duyulmuştur. Dünya’da en eski tapınağın keşfedildiği Göbeklitepe, Türkiye’nin Şanlıurfa şehrine 18 km mesafede bulunmaktadır. Bu bölgede, açığa çıkarılan bulguları, arkeolojik kalıntıları ve mimariyi topluma sunabilmek amacıyla bir ziyaretçi platformunun inşası planlanmıştır. Söz konusu çatı kanopi yapısında ziyaretçi platformunun çeşitli bölümlerinde kullanılan ahşap döşeme malzemesi, proje teknik şartnamesinde “bangkirai” türü ahşap olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, platformun ilgili bölümlerinde “bangkirai” türünde ahşap malzeme yerine “iroko” türünde ahşabın kullanılmasının uygun olup olmadığının ortaya konmasını amaçlamaktadır.

### Alıntı / Cite

Güneş, B., (2020). Evaluation of Different Wood Types in Terms of Durability and Treatability, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(1), 54-64.

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

B. Güneş, 0000-0003-1747-001X

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	30.05.2019
Revizyon Tarihi / Revision Date	16.07.2019
Kabul Tarihi / Accepted Date	18.07.2019
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: bgunes@istanbul.edu.tr, +90-212-473-7070 / 17931

## 1. Introduction

The archaeological site of Göbeklitepe has listed in the “World Heritage List of the UNESCO” in 2018 (WHC, 2018). The location lies near the Orencik village in the north-east of the Şanlıurfa Province, Turkey (Fig. 1). The findings were first discovered by a survey of Chicago and Istanbul Universities in 1963. Current excavations started by Prof. Schmidt Klaus are ongoing since 1995 and collaborated by various researchers. The site has a history, which roots back to twelve thousand years. From its first discovery to the present time, archaeologists are enlightening civilised human history with developments and research in this area. It is believed by the researches that, many artefacts are waiting to be unearthed and discovered in this region (Peters et al., 2014). A roofing project with a canopy structure has been planned to protect the findings from the ultraviolet effects of the sun and to provide a platform for visitors on the archaeological site. The plank flooring material used on this platform is designed with “bangkirai” type of wood (Technical-Specification, 2017). However, the selection of this wood type is costly and questionable, considering the environmental conditions of the related region. Besides this, the “iroko” type of wood is a cheaper material which is known for its suitability for land conditions in the Turkish market. The equivalence and the replaceability of these types of wood species are evaluated in terms of “durability and treatability concepts” considering the environmental conditions which the related project will be applied.



Figure 1. Location of the region (Google Maps, 2018)

## 2. Literature Survey

The literature on this topic shows that there are similar studies done for different wood types considering environmental conditions, mechanical properties and the economic benefits where some of them include a comparison regarding “durability and treatability” concepts (Ali et al., 2011; Dourado et al., 2008; Palanti et al., 2015; Hagedorn et al., 2003 and Verma et al. 2014). These studies use the data collected from laboratory test results, different analysis methods and in-situ dependent observatory methods to compare the aforementioned properties of various wood types. The purpose of the study by Ali et al. (2011) is to assess the natural durability of five different wood types (muanga, metil, namuno, ncurri and ntholo) using laboratory and field test methods. Soft-, brown-, and white-rot fungi and termites are used in the laboratory tests. They concluded that “muanga”, “ncurri” and “ntholo” species are resistant to soft-, brown- and white-rot fungi and the termites. The soft rot fungi did the most harm on these species among the hazardous organisms used in the tests. It is also concluded that “metil” type of wood is not resistant to these hazards. Thus, the authors do not recommend these wood types for exterior use if untreated (Ali et al., 2011). Dourado et al. (2008) compared the fracture strength of the two wood types (maritime pine and Norwat spruce) used in the timber construction through three-point bending tests. Load-displacement curves are experimentally and analytically obtained by finite element analysis. The energy released by the crack propagation of these types are assessed, and strength comparison is made by assessing the cracks and fracture process zone (Dourado et al., 2008).

The purpose of another study by Palanti et al. (2015) is to evaluate the natural durability of different wood species against marine organisms in the Messina Strait. The aim is to determine the most durable wood type among the four tropical wood species for the replacement of wooden docks. The tested wood species are Bilinga/Opepe (*Nauclea diderrichii* Merril), Okan (*Cylicodiscus gabunensis* Taub (Harms), Demerara Greenheart (*Ocota rodiaei* Mez) and Azobé (*Lophira alata* Banks ex Gaertn), which are also currently used wood species for docks (EN-275, 1992). Combined with software for image acquisition called Nis D3.22, is used in the assessment. It is concluded from the experiment results that Bilinga and Okan can well replace the current utilisation of Azobé for wooden banking in the Sicilian Strait. The used software captured slight differences which cannot be perceived by the human eye in the assessment described in EN-275 (1992). The authors stated that the achieved differences, which did not appear in visual assessment connected with the wide nominal durability classes of EN-275 (1992) might affect the choice of wood species that are not convenient for their purpose. As a result, from an economic perspective, improving the assessment by image analysis can be significant (Palanti et al., 2015). Hagedorn et al. (2003) conducted a comparative study on the pyrolysis of three different wood species. It is concluded that inorganic salts have a strong influence on the temperature of pyrolysis and also on the product distribution. The

authors stated that the differences in wood species are mainly due to the different thermochemical behaviour of lignin degradation and the first step of hemicellulose degradation. The paper by Verma et al. (2014) presents a study for the mechanical properties of bamboo to explore the possibility of its' usage as structural material instead of wood. Mechanical properties of bamboo laminae and their laminated bamboo epoxy composites were assessed under different loading conditions. It is concluded by the comparisons with woods that the average strength of bamboo laminae under different loading conditions is better than softwoods and comparable with hardwoods. The results show that bamboo can be used for fabrication of bamboo epoxy composites and bamboo epoxy composites can alternatively be used instead of wood and wood-based composites for structural purposes (Verma et al., 2014).

This study also presents a comparison between another type of wood species “bangkirai” and “iroko” with similar concepts based on the data provided in commonly used regulations. Similarly, with the papers aforementioned in this chapter, environmental conditions, mechanical properties and economic benefits are taken into consideration while assessing the replaceability of these species used on a real case. Furthermore, it is believed by the authors that experimental studies and field tests as presented in these papers will be worthwhile to verify and validate the conclusion about these two wood types as future work.

### 3. Environmental Conditions of the Location

Şanlıurfa Province has a mild, warm and temperate climate in general. The rain falls mostly in the winter, rarely in the summer in this region. The climate of this region can be classified as “Csa (Temperate-Dry Summer-Hot Summer)” according to the Köppen-Geiger climate classification system (Köppen, 1936; Geiger, 1954). The average temperature of the region is 18°C, and average rainfall is 477 mm. The climograph of the location is given in Fig. 2.

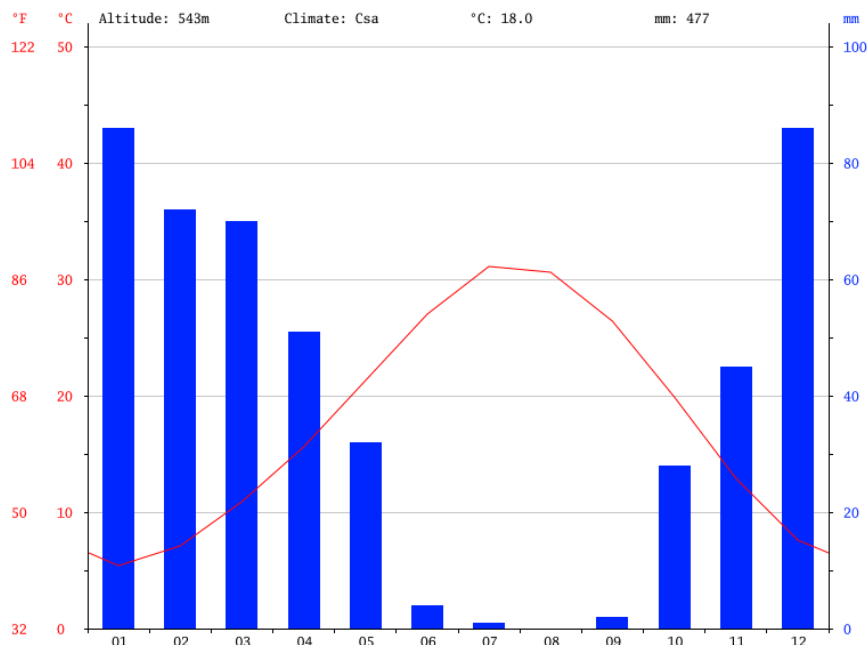


Figure 2. The climograph of Sanliurfa Province (Climate-Data, 2018).

The lowest precipitation level is measured in August according to this data. The peak level of the precipitation is reached in January with an average of 86 mm. The temperature graph of the location is given in Fig. 3.

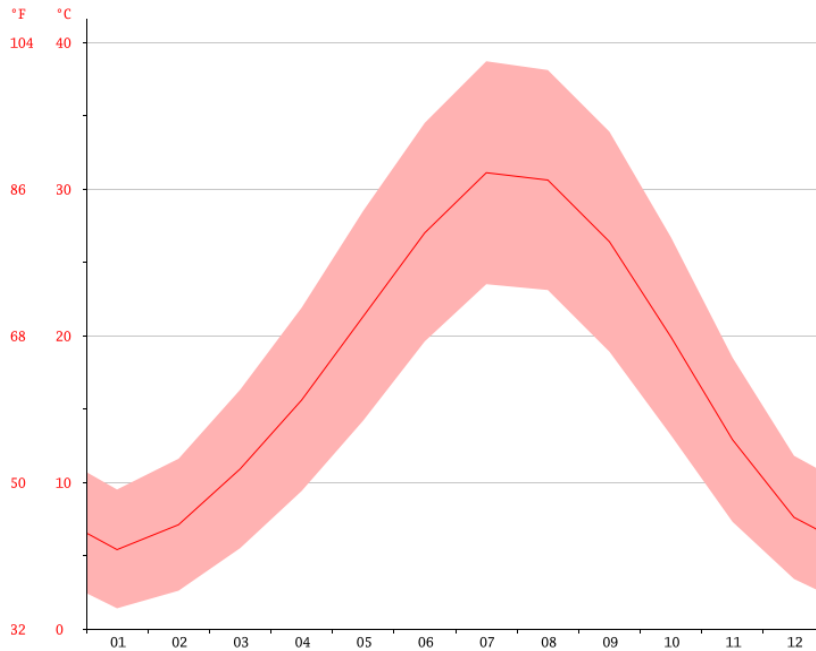


Figure 3. The temperature graph of Sanliurfa Province (Climate-Data, 2018).

The hottest month of the year is recorded as July with an average temperature of 31.1°C. The coldest month of the year is recorded as January with an average temperature of 5.4°C. The historical weather data of the location is given in Fig. 4.

	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Avg. Temperature (°C)	5.4	7.1	10.9	15.6	21.3	27	31.1	30.6	26.4	19.9	12.9	7.6
Min. Temperature (°C)	1.4	2.6	5.5	9.4	14.2	19.6	23.5	23.1	18.9	13.2	7.3	3.4
Max. Temperature (°C)	9.5	11.6	16.3	21.9	28.5	34.5	38.7	38.1	33.9	26.7	18.5	11.8
Avg. Temperature (°F)	41.7	44.8	51.6	60.1	70.3	80.6	88.0	87.1	79.5	67.8	55.2	45.7
Min. Temperature (°F)	34.5	36.7	41.9	48.9	57.6	67.3	74.3	73.6	66.0	55.8	45.1	38.1
Max. Temperature (°F)	49.1	52.9	61.3	71.4	83.3	94.1	101.7	100.6	93.0	80.1	65.3	53.2
Precipitation / Rainfall (mm)	86	72	70	51	32	4	1	0	2	28	45	86

Figure 4. The historical weather data of Sanliurfa Province (Climate-Data, 2018).

The difference in precipitation is 86 mm between the wettest and driest months at this location. The annual temperature varies around 25.7°C according to this data. Wood materials are widely used on the outer parts of structures and can easily be affected by the environmental effects. The selection of appropriate wood material at the plank flooring for visitor's platform should be sufficient in terms of durability concerning these environmental conditions.

#### 4. Description of the Roof Structure

The architectural and the structural design of the roof structure is carried out by "kleyer koblitz letzel freivogel gesellschaft von Architekten mbh" and "EiSat GmbH", respectively. The structure has an elliptical shape which consists of axes of the cable network, axes of membrane welds and rainwater drain pipe formations. Membrane welds' grid spacing varies between 1.82 m. and 3.00 m. Cable network grid spacing varies between 3.00 m. and 3.35 m. The structure has an irregular form which can be defined as concave inwards and outwards shell (crust) shape. The longitudinal cross-section consists of geometrical information about the axes representing main structural gridlines and elevations. The axes are generally having a spacing of 3.00 m. The elevation differs from +766.00 to +790.00 m. Fig. 5 and Fig. 6 shows the top view and the longitudinal cross-section drawings of the structure.



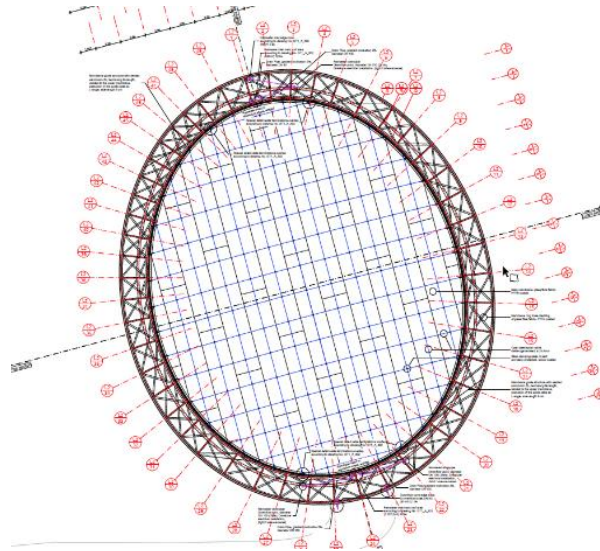


Figure 5. Top view of the roof structure (Arge, 2014).

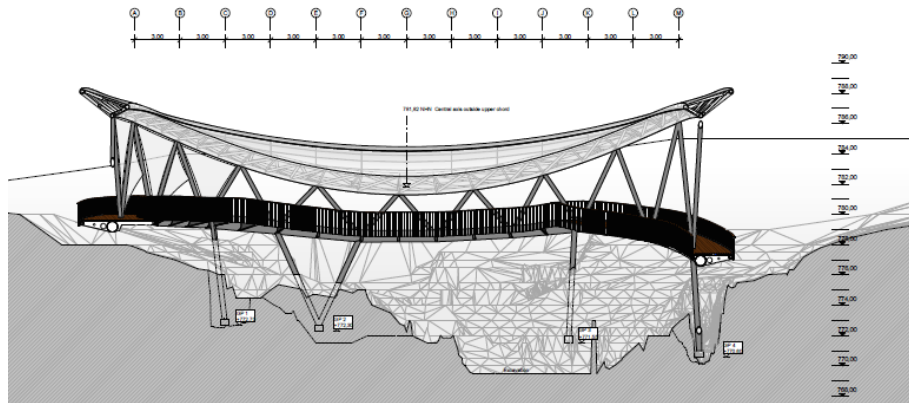


Figure 6. Longitudinal cross-section of the roof structure (Arge, 2014).

The visitor's platform of the structure has an elliptical shape with the dimensions of 43.5 m and 51.5 m in orthogonal directions. The plan of the visitor's platform consists of the formation of plank flooring and wooden handrails, the slope, and locations of the rainwater and the drainage pipes and the boundaries of weather protection screens. It is noted that wooden parts of the visitor's platform are planned to be built with "bangkirai" wood. The primary material of the weather protection screen is glass fiber fabric. Fig. 7 shows the plan of the visitor's platform and the details of weather protection screen.

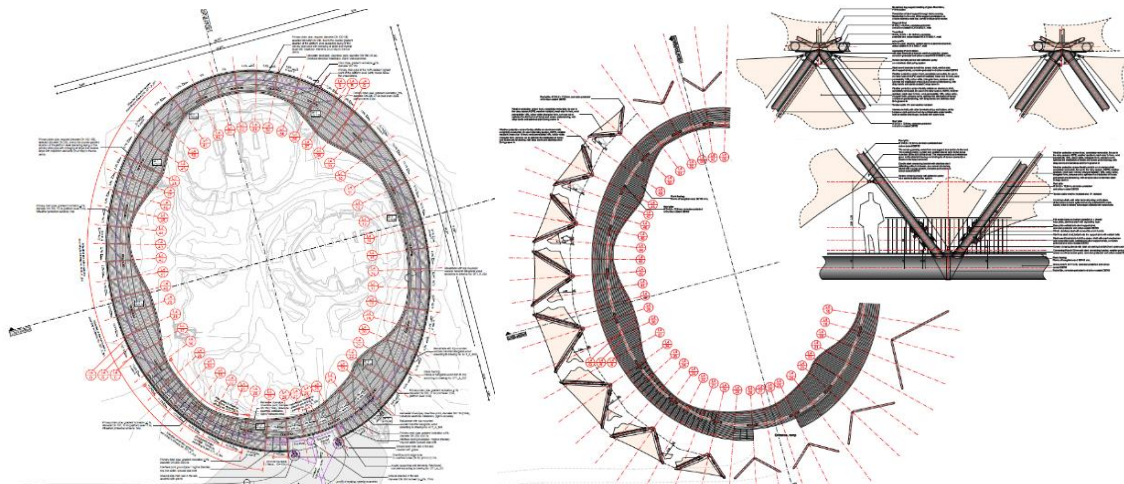


Figure 7. The plan of the visitor's platform and the details of the weather protection screen (Arge, 2014).

The width of the platform varies between 2 m and 4 m. The height of the handrails is 1.50 m. UPE120 and UPE140 profiles are used as supports for planks.  $\emptyset$  711 mm profiles are used as main girders, and 244.5/10 mm profiles are used as edge beams. Diagonal braces are as QRO 120/8 mm profiles. Wooden parts of the handrails are formed with 14x4 mm sections. Handrails are placed with a spacing of 0.132 m. Planks of “bangkirai” wood 30/145 mm sections are used as plank flooring. It is noted that; planks are grooved from the top and corrugated from the bottom. The spacing of 10 and 20 mm is left between the planks in transverse and longitudinal directions, respectively. The longitudinal sides of planks are grooved with springs made of curved aluminium sections in order to drain the rainwater. The total length of a plank is given as around 2.70 m having pin support conditions. The planks of “bangkirai” wood with dimensions of 30/124 mm are used as the risers. Where the platform is inclined, the dimensions of these planks are increased to 30/145. Fig. 8 shows the typical details of the visitor’s platform.

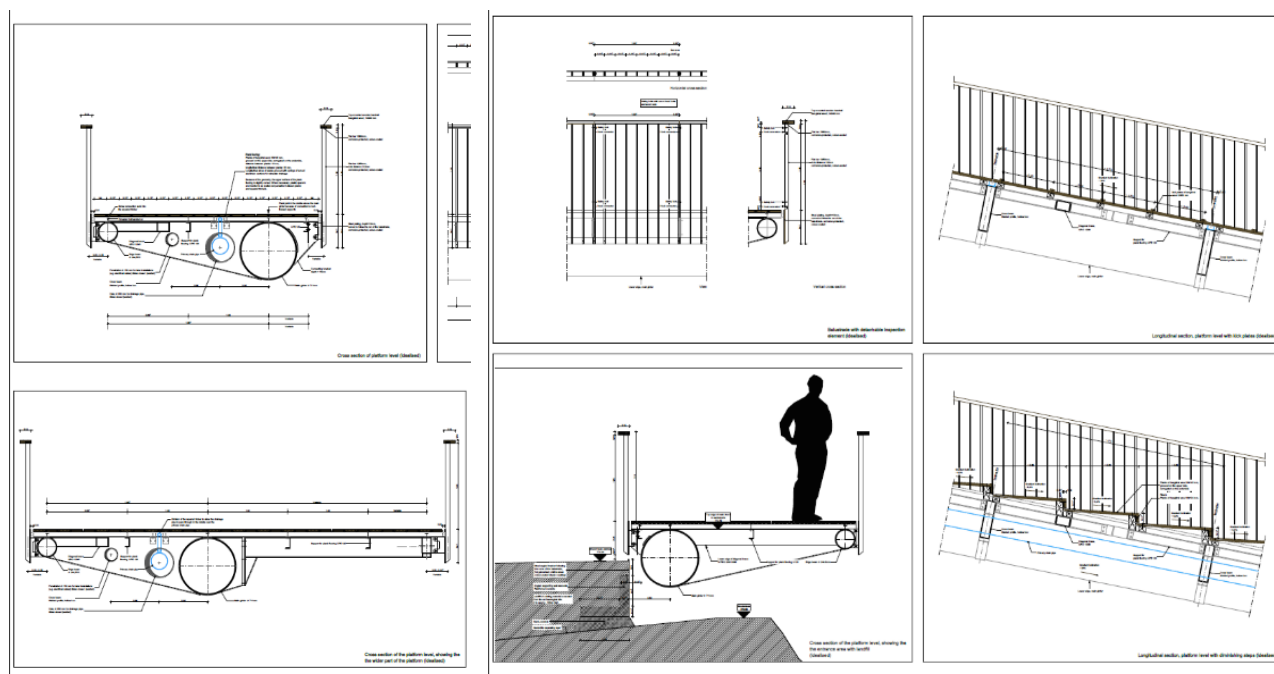


Figure 8. The typical details of the visitor’s platform (Arge, 2014).

## 5. Investigation of Standards

Mainly three different standards, namely EN-350 (2016), EN-335 (2013) and EN-460 (1994) are investigated to evaluate the wood types used on the visitor’s platform of the structure. Some concepts related to these standards are given under this chapter.

### 5.1. EN-350 (2016)

This standard gives guidance on methods for determining and classifying the durability of wood and wood-based materials against biological wood-destroying agents. The methods can be applied either to individual wood species, batches of wood and processed wood-based materials, including heat-treated, preservative-treated wood and modified wood. However, this standard is not intended to replace testing of the efficacy of biocides. The wood-destroying agents considered in this standard are; wood-decay fungi (basidiomycete and soft-rot fungi), beetles capable of attacking dry wood, termites, marine organisms capable of attacking wood in service. Data on the biological durability of selected wood species considered of economic importance in European countries are presented in Annex B (informative), which also provides information relating to their geographical origin, density, sapwood width and treatability.

### 5.2. EN-335 (2013)

This standard gives general definitions of use classes for different service situations and is relevant to solid wood and wood-based products and gives information on the biological agents that can attack wood and wood-based products in defined situations. The differences between the use classes mentioned in the standard are based on differences in environmental exposures that can make the wood or wood-based products susceptible to biological deterioration. EN 1995-1-1 (2004) defines a set of three service classes which are relevant to a designer when assigning strength values and calculating deformations for timber elements to be used in construction. These

service classes are determined by the wood moisture content corresponding to the humidity and temperature, which are expected to prevail in service. The wood moisture content is also an essential factor in biological durability, but the system of service classes in EN 1995-1-1 (2004) and the system of use classes in this standard differ in their considerations of the effects of this moisture, and individual classes do not directly align with one another. Table 1 gives guidance on the possible corresponding use classes for each of the service classes. Service class definitions in EN 1995-1-1 (2004) and use class definitions in this standard should be consulted to ensure correct classification. The attention of users is drawn to the need to avoid misinterpretation of any numbering system using classes for timber that cannot correspond precisely to the European use classes defined in EN 335 (2013). Specifiers need to work with both systems when designing load-bearing structures.

**Table 1.** Service classes and their possible corresponding use classes (EN-335, 2013).

SERVICE CLASS ACCORDING TO EN 1995-1-1	POSSIBLE CORRESPONDING USE CLASS ACCORDING TO EN 335:2012
1	Use class 1
2	Use class 1 Use class 2 if the component is in a situation where it could be subjected to occasional wetting caused by e.g. condensation
3	Use class 2 Use class 3 or higher if used externally

If the use class or intended use conditions of a component cannot be accurately determined, or when different parts of the same component are deemed to be in different use classes, decisions should be taken concerning the more severe of the possible use classes. In situations where wood components out of ground contact may permanently accumulate water due to their design, or where deposits of dirt, soil, leaves etc. for a more extended period can be expected, it may be necessary to consider that these situations are equivalent to contact with the ground or fresh water. In interior use situations where high wetting conditions are to be expected, it may be necessary to assign a more severe use class.

### 5.3. EN-460 (1994)

This Standard gives guidance on the selection of wood species based on their natural durability to attack by wood-destroying organisms for use as solid wood or as glued laminated timber (glulam) in the hazard classes defined in EN 335-1 (2013). This standard does not consider the durability characteristics of the glue used in glued laminated timber. The natural durability of a wood species should be considered separately for each wood-destroying organism. In practice supplies of sawn timber may include sapwood as well as heartwood. If the proportion of sapwood present is such that its loss would have adverse implications for the performance of the component, or if the sapwood and heartwood cannot be distinguished, the durability of the whole component should be regarded as equivalent to that of the sapwood. In addition to the natural durability, there are other factors that influence performance which should also be taken into consideration in the selection of a wood species and the decision whether or not it should be treated with a preservative. For instance, wood with low permeability may acquire lower moisture contents under intermittent wetting conditions, compared to more permeable species, and will, therefore, have a reduced risk of fungal attack under such service conditions. An indication of propensity to take up moisture may be obtained from the treatability classification of different wood species. Hence timbers having a particular natural durability classification for wood-destroying fungi and with a treatability classification of 3 or 4 may achieve an increased service life in out of ground contact conditions (hazard class 2 or hazard class 3) compared to the wood of similar durability classification but with a treatability classification of 1 or 2. General service situations and hazard classes are given in Table 2.

**Table 2.** General service situations and hazard classes (EN-460, 1994).

HAZARD CLASSES	GENERAL SERVICE SITUATIONS
1	Above ground, covered (dry)
2	Above ground, covered (risk of wetting)
3	Above ground, not covered
4	In contact with the ground or fresh water
5	In salt water

## 6. Investigation of Wood Types

Properties and characteristics of the two wood types (bangkirai and iroko) are presented in this chapter. The data is collected from “TROPIX 7 cirad / the main technological characteristics of 245 tropical wood species” database prepared by “BioWooEB Research Unit (Biomass, Wood, Energy, Bioproducts)” (BioWooEB, 2012).

### 6.1. Descriptions and Properties

The family of “bangkirai” wood is “dipterocarpaceae (angiosperm)”, and the scientific names are “shorea glauca, shorea laevis and shorea spp.”. The family of “iroko” wood is “moraceae (angiosperm)”, and the scientific names are “milicia excelsa and milicia regia.” Wood and log descriptions of the two wood types are given in Table 3. Physical, mechanical and acoustic properties of these wood types are presented in Table 4.

**Table 3.** Wood and log descriptions of “bangkirai” and “iroko” wood types (BioWooEB, 2012).

PROPERTIES	BANGKIRAI WOOD	IROKO WOOD
<b>Color:</b>	yellow-brown	yellow-brown
<b>Sapwood:</b>	not clearly demarcated	clearly demarcated
<b>Texture:</b>	medium	coarse
<b>Grain:</b>	straight or interlocked	interlocked
<b>Interlocked grain:</b>	slight	slight
<b>Diameter:</b>	from 70 to 90 cm	from 80 to 100 cm
<b>Thickness of sapwood:</b>	from 2 to 8 cm	from 5 to 10 cm
<b>Floats:</b>	no	no
<b>Log durability:</b>	good	moderate
		(treatment recommended)

**Table 4.** Physical, mechanical and acoustic properties of “bangkirai” and “iroko” wood types (BioWooEB, 2012).

PROPERTIES	BANGKIRAI WOOD	IROKO WOOD
<b>Specific gravity*:</b>	0.91	0.64
<b>Monnin hardness*:</b>	7.3	4.1
<b>Coefficient of volumetric shrinkage:</b>	0.68%	0.44%
<b>Total tangential shrinkage (TS):</b>	9.5%	5.4%
<b>Total radial shrinkage (RS):</b>	4.2%	3.5%
<b>TS/RS ratio:</b>	2.3	1.5
<b>Fiber saturation point:</b>	23%	23%
<b>Stability:</b>	moderately stable	moderately stable
<b>Crushing strength*:</b>	85 MPa	54 MPa
<b>Static bending strength*:</b>	150 MPa	87 MPa
<b>Modulus of elasticity:</b>	22940 MPa	12840 MPa
<b>Musical quality factor:</b>	116.8 measured at 2689 Hz	126.8 measured at 2527 Hz
The data presented in this table represent mean values		
*: at 12% moisture content, with 1 MPa = 1 N/mm <sup>2</sup>		

When the log durability of the two wood types is compared, “bangkirai” type of wood is classified as “good” and “Iroko” type of wood is classified as “moderate”. In case of usage of “iroko” type of wood, treatment is recommended concerning the log durability. The main differences between the two types are about strength values. “Bangkirai” wood has higher crushing and static bending strength values like 36% and 42%. The modulus of elasticity of “bangkirai” wood is %44 higher than “iroko” wood. The stability of the two materials is classified as “moderately stable”. By these facts, it is recommended to decrease the span length of the planks to the half where this material is planned to be used on the related wooden parts of the structure. The decrease of span lengths can be ensured by attaching additional supports at the previous midspans of the plank flooring. It is believed that the differences shown in the other descriptions given in Table 3 and Table 4 do not strongly affect the selection of “iroko” instead of “bangkirai” type in terms of durability and treatability concepts.

## 6.2. Durability and Treatability

The classification of “bangkirai” and “iroko” wood on the natural durability and treatability characteristics and properties are given in Table 5. Fungi and termite resistance refers to end-uses under temperate climate. Except for special comments on sapwood, natural durability is based on mature heartwood. Sapwood must always be considered as non-durable against wood degrading agents. E.N. Std.s refers to Euro Norm Standards. It is indicated in the same document that in case of risk of temporary and permanent humidification, neither “bangkirai” nor “iroko” wood types do not require any preservative treatment. Only “bangkirai” type of wood requires an appropriate preservative treatment against dry wood borer attacks. “Iroko” type is durable against this kind of attacks. The durability and treatability characteristics of “bangkirai” and “iroko” wood types, according to EN-350 (2016) standard are given in Table 6. “Bangkirai” and “iroko” woods are marked in red and blue rectangles, respectively.

**Table 5.** Natural durability and treatability of “bangkirai” and “iroko” wood (BioWooEB, 2012).

PROPERTIES	BANGKIRAI WOOD	IROKO WOOD
<b>Fungi*:</b>	class 2 – durable	class 1-2 – very durable to durable
<b>Dry wood borers:</b>	heartwood durable but sapwood not clearly demarcated	durable – sapwood demarcated (risk limited to sapwood)
<b>Termites*:</b>	class D – durable	class D – durable
<b>Treatability*:</b>	class 4 – not permeable	class 4 – not permeable
<b>Use class ensured by natural durability:</b>	class 4 – in ground or fresh water contact	class 3 – not in ground contact, outside
<b>Species covering the use class 5:</b>	yes	no

**\*according to E.N. Standards.**  
**Note:** These species are listed in the European standard NF EN 350-2. The data presented in this table represent mean values.  
**Bangkirai:** The possible presence of few demarcated sapwood in sawnwood may have an influence on the expected durability. Only *Shorea laevis* has a good enough natural durability to allow end-uses under use class 5 (end-uses in marine environment or in brackish water). It is due to its high specific gravity and high silica content. According to the European standard NF EN 335, performance length might be modified by the intensity of end-use exposition.  
**Iroko:** The heartwood does not cover the use class 4 required for end-uses in contact with permanent humidity (example: contact with ground). On the other hand, if the constructive system is well-drained, without water trap, this species can be used outside without any treatment. Heartwood is hardly permeable to preservative products. This species naturally covers the use class 5 (end-uses in marine environment or in brackish water) due to its high specific gravity and hardness. According to the European standard NF EN 335, performance length might be modified by the intensity of end-use exposition.

**Table 6.** The durability of heartwood and treatability of softwood species (BioWooEB, 2012).

N°	Scientific name	Code acc. to EN 13556	Common name	Origin	Density/ kg/m <sup>3</sup> at 12 % MC	Durability of heartwood				Treatability		Sap wood width	Additional data / information when available
						Fungi	Beetles	Termites	Marine borers	Heart wood	Sap wood		
	<i>R. albiflora</i> Marc.-Berti <i>R. retusa</i> Marc.-Berti												
111	<i>Rhodognaphalon</i> spp. <i>R. brevicuspe</i> Roberty <i>R. schumannianum</i> Robyns	RHXX	X: Kondroti	W/E Africa	470–480–490	5	D	S	S	1	1	b	
112	<i>Sextonia rubra</i> van der Werff (also <i>Sextonia rubra</i> )	OCRB	X: Louro vermelho O: Red Louro	S America	600–620–650	2	D	D	D	4	2	m	
113	<i>Shorea</i> spp. subgen. <i>Eushorea</i> <i>S. glauca</i> King <i>S. laevis</i> Ridl. <i>S. maxwelliana</i> King <i>S. superba</i> Symington	SHBL	X: Yellow Balau O: Bangkirai	SE Asia	700–930–1150	2	D	D	D	4	1-2	s	Not resistant to termites under lab conditions
85	<i>Mezilaurus</i> spp. <i>M. itauba</i> Taub. <i>M. navalium</i> Taub.	MZXX	X: Itauba	S America	800–850–950	1	D	D	D	4	n/a	s	
86	<i>Micropholis</i> spp. <i>M. gardnerianum</i> Pierre <i>M. melinoniana</i> Pierre <i>M. venulosa</i> Pierre	MPWW	X: Curupixa F: Balata blanc	S America	650–750–850	4	S	S-M	S	2	n/a		
87	<i>Milicia</i> spp. <i>M. excelsa</i> C. C. Berg <i>M. regia</i> C. C. Berg	MIXX	X: Iroko O: Kambala	W/E Africa	630–650–670	1-2	D	D	D	4	1	m	Sapwood not resistant to <i>Lyctus</i> Not resistant to termites under lab conditions

Investigations and results according to durability and treatability, are summarised as follows:

- Fungi (according to E.N. standards): “Bangkirai” type of wood is classified as “class 2 – durable”. “Iroko” type of wood is classified as “class 1-2 - very durable to durable”. Thus, “iroko” type of wood can be used instead of “bangkirai” type of wood with respect to the durability to Fungi.
- Termites (according to E.N. standards): Both of the “bangkirai” and “iroko” type of woods are classified as “class D – durable”. Thus, “iroko” type of wood can be used instead of “bangkirai” type of wood with respect to the durability to Termites.
- Beetles (according to E.N. standards): Both of the “bangkirai” and “iroko” type of woods are classified as “class D – durable”. Thus, “iroko” type of wood can be used instead of “bangkirai” type of wood with respect to the durability to Beetles.
- Marine borers (according to E.N. standards): Both of the “bangkirai” and “iroko” type of woods are classified as “class D – durable”. Thus, “iroko” type of wood can be used instead of “bangkirai” type of wood with respect to the durability to Marine borers.
- Treatability (according to E.N. standards): Both of the “bangkirai” and “iroko” type of woods are classified as “class 4 – not permeable”. Thus, “iroko” type of wood can be used instead of “bangkirai” type of wood with respect to the treatability.
- Use class ensured by natural durability: “Bangkirai” type of wood is classified as “class 4 – in ground or fresh water contact”. “Iroko” type of wood is classified as “class 3 – not in ground contact, outside”. The related parts of the structure are not in contact with the ground, directly. These parts are locally exposed to fresh water. The drainage system is sufficient to evacuate fresh water to avoid the accumulation of water on the related parts of the visitor’s platform. Thus, “iroko” type of wood can be used instead of “bangkirai” type of wood with respect to the natural durability considering the location of the parts of the structure that this material will be used.

## 7. Conclusion

The type of plank flooring material used on various parts of visitor’s platform was investigated within the scope of this study for the roof canopy structure planned to be built on Göbeklitepe Project located in Şanlıurfa, Southeastern Anatolia, Turkey. The aim is to answer that is it convenient and suitable to use “iroko” type of wood instead of “bangkirai” type of wood on the related parts of the visitor’s platform for environmental conditions, economic reasons and availability in the related region. The investigations and evaluation were done only for “durability and treatability” concepts. The results of the investigations and evaluation show that both of the wood types have sufficient durability against fungi, termites, beetles and marine borers. Both of the wood types are classified as “class 4 – not permeable” which satisfies the euro norms about treatability. Since the visitor’s platform of the structure is not directly in contact with water, “iroko” wood’s natural durability class (class 4-not in ground contact, outside) is acceptable considering the location of plank flooring and efficiency of the drainage system to avoid water accumulation on the planks. The log durability of “bangkirai” type of wood is classified as “good”. However, the log durability of “Iroko” type of wood is classified as “moderate”. Thus, if the “iroko” type of wood will be used instead of “bangkirai” type of wood, treatment is recommended with respect to the log durability. It is also recommended that the span length should be decreased to its half where this material is planned to be used on the related wooden parts of the structure by attaching additional supports at the previous midspan. Therefore, it is concluded that “iroko” type of wood can be used instead of “bangkirai” type of wood as the plank flooring material used on various parts of visitor’s platform for Göbeklitepe Canopy Project. This suitability is only valid for the “durability and treatability” concepts considering the recommendations given and by the validity of conditions provided in this study.

## Acknowledgement

The author would like to acknowledge the Trans-T Construction Industry and Trade Inc.

## Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

## References

- Ali A.C., Junior E.U., Raberg U., Terziev N. (2011). Comparative naturel durability of five wood species from Mozambique. *International Biodeterioration & Biodegradation* 65: 768-776.
- Arge (2014). Göbeklitepe project drawings. Karacadağ Development Agency, designed by: kleyer.koblitz.letzel.freivogel gesellschaft von architekten mbh & EiSat GmbH.



- BioWo0EB. (2012). The main technological characteristics of 245 tropical wood species. Retrieved from TROPIC 7 cirad.: <http://tropix.cirad.fr/en>.
- Climate-Data (2018). CLIMATE-DATA.ORG. Retrieved from <https://en.climate-data.org/location/289/>.
- Verma, C.S., Sharma, N.K., Chariar V.M., Maheshwari S., Hada M.K. (2014). Comparative study of mechanical properties of bamboo laminae and their laminates with woods and wood based composites. *Composites: Part B* 60: 523-530.
- EN 275 (1992). Wood preservatives. Determination of the protective effectiveness against marine borers. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.
- EN 335 (2013). Durability of wood and wood-based products — Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 350 (2016). Durability of wood and wood-based products – Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 460 (1994). Durability of wood and wood-based products - Natural durability of solid wood - Guide to the durability requirements for wood to be used in hazard classes. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 1995-1-1 (2004). Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN).
- Geiger, R. (1954). Klassifikation der Klimate nach W. Köppen" (Classification of climates after W. Köppen). *Landolt-Börnstein – Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik*, 3: 603-607.
- Google-Maps (2018). Google Maps. Retrieved from Google LLC: <https://goo.gl/maps/ZpR4HfSeFMC2>.
- Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate (The geographic system of climates). In W. Köppen, & R. Geiger, *Handbuch der Klimatologie*. Berlin: Borntraeger.
- Müller-Hagedorn M., Bockhorn H., Krebs L., Müller U. (2003). A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. *Journal of analytical and applied pyrolysis* 68-69: 231-249.
- Dourado N., Morel S., de Moura M.F.S.F., Valentin G., Morais J. (2008). Comparison of fracture properties of two wood species through cohesive crack simulations. *Composites: Part A* 39: 415-427.
- Peters J., Schmidt K., Dietrich O., Pöllath N. (2014). Göbekli Tepe: Agriculture and Domestication. *Researchgate*.
- Palanti S., Feci E., Anichini M. (2015). Comparison between four tropical wood species for their resistance to marine borers (*Teredo* spp and *Limnoria* spp) in the Strait of Messina. *International Biodeterioration & Biodegradation* 104: 472-476.
- Technical-Specification (2017). Construction Works for Revitalization of History in Şanlıurfa, Vol3, Technical Specifications, Section 1, Roof Canopy for Göbeklitepe Archeological Site.
- WHC (2018). World Heritage Centre, World Heritage List. Retrieved from United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO): <https://whc.unesco.org/en/list/1572>.



## İZOTROPİK MALZEMELERİN SÜNEK KIRILMA GEZENEKLERİNİN TAYİNİ

Fuzuli Ağrı AKÇAY\*

İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Türkiye  
Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Central Florida, Orlando, FL 32816, USA

### Anahtar Kelimeler

*Kırılma,  
Süneklik,  
Plastisite,  
KAEB,  
MSS.*

### Öz

Kırılma mekaniği camiası tarafından genel kabul görmüş bir sünek kırılma kriteri henüz bulunmamaktadır. Literatürdeki çeşitli sünek kırılma kriterlerinin, kalibre edilen parametre sayısı ve modelin doğruluğu göz önünde bulundurularak karşılaştırılması sonucunda Maksimum Kayma Gerilmesi (MSS) kriterinin en avantajlı kriter olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın, bu karşılaştırma çalışmalarında yakın zamanda geliştirilmiş Karr-Akçay Enerji Dengesi (KAEB) kriteri göz önünde bulundurulmamıştır. Dolayısıyla, bu çalışmada, KAEB kriteri ile MSS kriteri deney sonuçları üzerinden karşılaştırılarak, her iki kriterin üstünlükleri ve eksiklikleri tartışılmıştır. MSS kriterinin yalnızca Lode açısına/parametresine bağlı bir kriter olması temel zayıflıklarından bir tanesidir. Buna karşın, KAEB kriteri gerilme üçeksenliliği ve Lode açısı/parametresi bağılıklarını özünde içermektedir. Bununla birlikte, her iki kriter de yalnızca bir adet kalibrasyon parametresi hesabını gerektirir. Bu çalışmada, kalibre edilen parametre sayısı ve modelin doğruluğu göz önünde bulundurulduğunda, KAEB kriterinin MSS kriterine göre daha avantajlı bir kriter olduğu gözlemlenmiştir.

## CHARACTERIZATION OF DUCTILE FRACTURE LOCI OF ISOTROPIC MATERIALS

### Keywords

*Fracture,  
Ductility,  
Plasticity,  
KAEB,  
MSS.*

### Abstract

There is no generally accepted ductile fracture criterion by the fracture mechanics community. As a result of the comparison of various ductile fracture criteria proposed in the literature, Maximum Shear Stress (MSS) criterion has been observed to be the most advantageous criterion with respect to the number of calibrated parameters and the accuracy of the model. Nevertheless, recently developed Karr-Akçay Energy Balance (KAEB) criterion was not evaluated in these studies. Therefore, in this study, KAEB criterion and MSS criterion are compared, and the advantages and disadvantages of both criteria are discussed. One of the fundamental shortcomings of MSS criterion is that the criterion is based on Lode angle/parameter only. In contrast, KAEB criterion contains the stress triaxiality and Lode angle/parameter dependence inherently. Both criteria, however, require only one calibration parameter. In this study, KAEB criterion is observed to be more advantageous compared to MSS criterion with respect to the number of calibrated parameters and the accuracy of the model.

### Alıntı / Cite

Akçay, F. A. (2020). İzotropik Malzemelerin Sünek Kırılma Gezeneklerinin Tayini, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 65-73.

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

F. A. Akçay, 0000-0002-5116-0069

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	19.03.2019
Revizyon Tarihi / Revision Date	23.11.2019
Kabul Tarihi / Accepted Date	06.12.2019
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: akcayfu@itu.edu.tr, +90-212-285-6427

## 1. Giriş (Introduction)

Gemi, açık deniz yapıları, uçak ve otomobil gibi büyük taşıma araçlarını güvenli bir şekilde tasarlamak ve inşa etmek insanlığın bilhassa ilgisini çekmiştir. Çünkü bahsi geçen mobil yapıların hasara uğraması insan hayatına da mal olabileceğinden, bu yapılar güvenli bir operasyon ömrüne sahip olmalıdır. Bu tür yapıların güvenliği büyük ölçüde, sistemin çarpışma, diğer nesnelere kazara çarpma ve bazı durumlarda patlama gibi aşırı yüklenme koşullarına dayanma kabiliyetine bağlıdır. Dolayısıyla, tasarımcıların ve mühendislerin, tasarım gereksinimlerini karşılarken, asgari ağırlık ve maliyetle birlikte, yapının herhangi bir bölümünün kırılmaya karşı dayanımını da göz önünde bulundurmaları gerekmektedir.

İnsanlığın kırılma konusuna olan ilgisi çok uzun zaman önce başlamış olsa da, kırılmaya sebep olan mekanizmaları anlama ve açıklama çabalarının çoğu son yüzyılda ilerleme kaydetmiştir. Griffith (1921), enerji dengesi yaklaşımı kullanarak halihazırda eliptik bir çatlak bulunduran (gevrek) malzemeler için kırılma kriteri geliştirmiştir. Kırılma kriterinin çıkarımında, Griffith sistemin yalnızca elastik gerinim enerjisini hesaba dahil etmiş ve formülasyonunu gevrek bir malzeme olan cam ile deneyler yaparak doğrulamıştır. Bununla birlikte, bu kriter sünek malzemeler için tatmin edici sonuçlar vermemiştir. Daha sonra Orowan (1945, 1949) ve Irwin (1948) plastik deformasyonun sünek kırılmada önemli bir rol oynadığını göstermiştir; dolayısıyla, plastik iş katkısı formülasyona dahil edilmelidir. Benzer bir çabada, Irwin (1957), çatlak ucu civarındaki gerilme dağılımının "çatlak-uzama-kuvveti" ile belirlenebildiğini göstermiş ve Griffith'in formülasyonunu rastgele çatlak geometrileri ve yüklenme koşulları için genelleştirmiştir. Gerilme şiddeti faktörü ve çatlak-uzama-kuvveti kavramlarının Irwin (1957) tarafından geliştirilmesinden yaklaşık on yıl sonra, çatlak-uzama-kuvveti (aynı zamanda gerinim enerji salınım oranı) hesabı için Rice (1968) tarafından yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, yörüngeden bağımsız bir çizgisel integralin değerlendirilmesinden oluşur ve J integrali olarak adlandırılır.

Takip eden eğilim, mekanizma bazlı kırılma modelleri geliştirmeye yönelik olmuştur. Boşluk oluşma, büyüme ve birleşme mekanizması tespit edilmiş ve kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. McClintock (1968), Rice ve Tracey (1969), Gurson (1977), Tvergaard (1981) ve Tvergaard ve Needleman (1984) tarafından yapılan temel çalışmalar sünek kırılmanın bilhassa hidrostatik basınçtan etkilendiğini ortaya çıkarmıştır. Buna göre, malzeme sünekliğinin bir ölçüsü olan eşdeğer gerinim, gerilme tensörünün birinci değişimine bağlı hale getirilmiştir. Bununla birlikte, yukarıda bahsedilen çalışmalar, nispeten yüksek gerilme üçeksenliliği ile tayin edilen açılma kırılmasını doğru tespit etmekte, fakat kayma kırılması tespitinde yarılmaktadır. Dolayısıyla, kayma kırılmasını tanımlamak üzere boşluk büyüme ve birleşme modellerini genişleten girişimlerde bulunulmuştur (bkz. örn. Nahshon ve Hutchinson, 2008; Malcher vd., 2014). Farklı bir mikromekanik boşluk büyüme modeli Kiran ve Khandelwal (2013a) tarafından önerilmiş, Kiran ve Khandelwal (2013b) tarafından ise ASTM A992 çeliği üzerinde uygulanmıştır.

Fizik temelli sünek kırılma modellerine paralel olarak, kapsamlı deney sonuçlarına dayanarak önerilen birtakım ampirik kırılma modelleri de literatürde kalıcı yer tutmuştur (bkz. örn. Cockcroft ve Latham, 1968; Hancock ve Mackenzie, 1976; Johnson ve Cook, 1985). Başka kapsamlı bir deney programı, eksenel simetrik ve düzlem gerilme yüklenme koşulları altında basma, kayma, tek eksenli ve çift eksenli gerilmeler de dahil olmak üzere, Bao ve Wierzbicki (2004) tarafından Al2024-T351 alaşımı üzerinde yürütülmüştür. Wierzbicki vd. (2005), birleşik çekme-kayma-basma yüklemesi altında özel olarak tasarlanmış kelebek numuneler üzerinde bir dizi kırılma testi gerçekleştirmiştir. Çekme-burulma yüklenme koşulları altındaki boru numunelerinin iki-eksenli kırılma testlerinin sonuçları Barsoum ve Faleskog (2007) tarafından yayınlanmışken, Korkolis ve Kyriakides (2008) iç basınç ve eksenel gerilme veya basmaya tabi tutulmuş 6260-T4 alüminyum tüplerinin kırılmasını incelemiştir. Birleşik çekme-burulma deneyleri TRIP780 çelik levhalar (bkz. örn. Dunand ve Mohr, 2011) ve yüksek mukavemetli çelik 36NiCrMo16 (bkz. örn., Papisidero vd., 2014) da dahil olmak üzere, farklı malzemeler için de gerçekleştirilmiştir. Yakın zamanda, Charoensuk vd. (2017) yüksek mukavemetli çelik sınıfı 780 ve 1000'den üç farklı doğrultuda alınan çeşitli geometrik numuneler üzerinde çekme testleri gerçekleştirmiş ve gerilme üçeksenliliği, Lode açısı ve eşdeğer gerinim uzayında kırılma gezeneğini elde etmiştir. Son onbeş yılda yürütülen bu deneysel çalışmaların hepsinde malzeme sünekliğinin hem gerilme üçeksenliliği hem de Lode açısına/parametresine bağlı olduğu gösterilmiştir.

Bu doğrultuda, araştırmacılar mevcut modelleri genişletmiş, gerilme üçeksenliliği ve Lode açısına/parametresine bağlılığı içeren yeni modeller geliştirmiştir. Gerilme tensörünün üçüncü değişimi Wierzbicki ve Xue (2005) tarafından ortaya atılmış, (üçüncü deviatorik gerilme değişimine bağlı olan) Lode açısının etkisi Bai ve Wierzbicki (2008) tarafından sünek kırılma modeline dahil edilmiştir. Asimetrik kırılma modelinin genel formu, klasik Mohr-Coulomb kırılma modelinin eşdeğer plastik gerinim, gerilme üçeksenliliği ve Lode açısı uzayına aktarılmasıyla Bai ve Wierzbicki (2010) tarafından ortaya konulmuştur. Modifiye edilmiş Mohr-Coulomb (MMC) kırılma modeli, Li vd. (2010) ve Luo ve Wierzbicki (2010) tarafından yüksek mukavemetli çelik ve alüminyum alaşımları üzerindeki deney sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır. Bu model anizotropik bir akma kriteriyle birlikte AHSS çeliği için köşe kırılması ve düzlem gerinim simülasyonlarında da uygulanmıştır (bkz. örn. Wang vd.,

2014; Wang ve Wierzbicki, 2015). Gerilme vektörünün büyüklüğünü (MSV) kullanan bir kriter Khan ve Liu (2012) tarafından önerilmiştir. Lou ve Huh (2013) metal levha kırılması tahmininde kullanılmak üzere bir sünek kırılma modeli önermiş ve bu model Park vd. (2015) tarafından hem anizotropi hem de yükleme geçmişi etkilerini göz önüne alacak şekilde modifiye edilmiştir. Mohr ve Marcadet (2015), lokalizasyon kriterinin, gerilme uzayından, eşdeğer plastik gerinim, gerilme üçeksenliliği ve Lode açısı uzayına aktarılmasıyla yeni bir kırılma modeli elde etmiştir. Yakın zamanda, Jia ve Bai (2016a, 2016b) gerilme değişmezi bazlı MMC kırılma modelini, düzlem gerilme koşulu altında tamamen gerinim bazlı MMC (eMMC) modeline dönüştürmüştür. Bu modifikasyon, kırılma gerinimini, gerilme üçeksenliliği ve Lode açısı yerine doğrudan dijital görüntü korelasyonu (DIC) ile ölçülebilen 'gerinim oranı' uzayında öngörmeyi mümkün kılmıştır. Bu model, Jia vd. (2017) tarafından TRIP780 ve magnezyum AZ31B-H24 alaşım levhalarının kırılma özelliklerini araştırmak için kullanılmıştır. Yakın zamanda geliştirilmiş diğer bir model ise enerji konseptine dayanmaktadır. Karr ve Akçay (2016), enerji salınım oranlarının sürekli ortamda modellenmesine dayanan, gerilme üçeksenliliği ve Lode açısı/parametresi bağılıklarını özünde içeren analitik bir sünek kırılma kriteri geliştirmiştir.

Yukarıdaki metinde de geniş bir şekilde değinildiği üzere, kırılma mekaniğinde farklı çalışma grupları tarafından bir çok kriter önerilmiştir. Buna karşın, her bir kriterin kendine özgü üstünlükleri ve eksikleri bulunması sebebiyle kırılma mekaniği camiası tarafından henüz genel kabul görmüş bir sünek kırılma kriteri bulunmamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmanın amacı, yakın zamanda geliştirilmiş Karr-Akçay Enerji Dengesi (KAEB) kriteri ile Maksimum Kayma Gerilmesi (MSS) kriterini deney sonuçları üzerinden karşılaştırarak, yeni kriterin değerlendirilmesi ve literatürdeki eksikliği giderme ihtimalini tartışmaktır. Karşılaştırmada MSS kriterinin kullanılmasının sebebi, literatürdeki çeşitli sünek kırılma kriterlerinin kalibre edilen parametre sayısı ve modelin doğruluğu göz önünde bulundurularak karşılaştırılması sonucunda, MSS kriterinin en avantajlı kriter olduğunun gözlemlenmiş olmasıdır (Wierzbicki vd., 2005; Habibi vd., 2018).

Makale şu şekilde devam etmektedir: Kırılma kriterleri ikinci bölümde tanıtılmış ve literatürdeki deney sonuçları kullanılarak üçüncü bölümde kalibre edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ise dördüncü bölümde sunulmuş ve tartışılmıştır.

## 2. Kırılma Kriterleri: Karr-Akçay Enerji Dengesi (KAEB) Kriteri ve Maksimum Kayma Gerilmesi (MSS) Kriteri (Fracture Criteria: Karr-Akçay Energy Balance (KAEB) Criterion and Maximum Shear Stress (MSS) Criterion)

Bu bölümde, öncelikle kırılma mekaniğinde oldukça sık kullanılan iki parametrenin (gerilme üçeksenliliği ve Lode parametresi) matematiksel tanımları sunulmuştur. Daha sonra, karşılaştırılması ve değerlendirilmesi yapılacak sünek kırılma kriterleri sunulmuştur.

Gerilme üçeksenliliği ve Lode parametresi her üç gerilme değişmezini de tanımlarında barındırdığı için herhangi bir gerilme durumunu temsil etmede kullanılabilir. Gerilme üçeksenliliği birinci gerilme değişmezinin (hidrostatik basıncın) etkisini barındırmakta iken, Lode parametresi üçüncü gerilme değişmezinin etkisini barındırmaktadır. Gerilme üçeksenliliği ( $\eta$ ) ve Lode parametresi ( $\mathcal{L}$ ) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\eta = \frac{(\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III})/3}{\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2]}} \quad (1a)$$

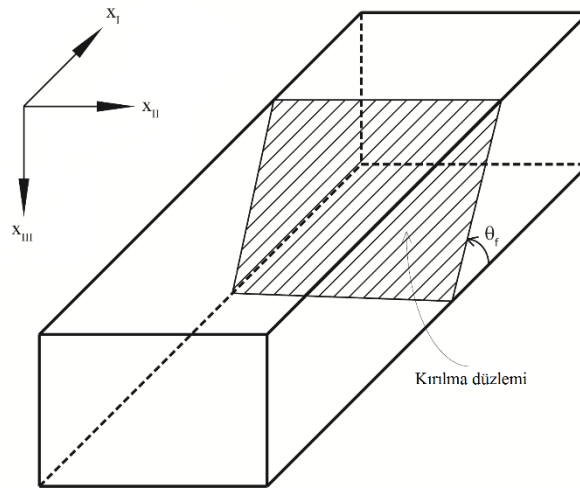
$$\mathcal{L} = \frac{2\sigma_{II} - \sigma_I - \sigma_{III}}{\sigma_I - \sigma_{III}} \quad (1b)$$

Burada,  $\sigma_I \geq \sigma_{II} \geq \sigma_{III}$  olmak üzere her bir gerilme alt indiste belirtilen doğrultudaki asal gerilmeyi temsil etmektedir.

### 2.1 Karr-Akçay Enerji Dengesi (KAEB) Kriteri (Karr-Akçay Energy Balance (KAEB) Criterion)

Enerjinin korunumu prensibi, bir cisim üzerinde dış kuvvetler tarafından yapılan iş ve diğer tüm enerji değişim oranları toplamının, iç enerji ve kinetik enerji değişim oranları toplamına eşit olmasını gerektirir (Eringen, 1980). Bu çalışmada, sistem üzerinde yapılan işin yalnızca dış kuvvetler tarafından yapıldığı, bundan başka hiçbir enerjinin sisteme girmediği durum değerlendirilmektedir. Ayrıca, sistemin dengede olduğu ve yarı-statik koşullara maruz kaldığı varsayılmıştır (yani, sistemin kinetik enerjisi ihmal edilmiştir). Ek olarak, sünek kırılmada plastik şekil değiştirme egemen olduğu için, plastik işe nazaran oldukça küçük olan elastik iş ihmal edilmiştir. Son olarak, makro ölçekte başlangıçta herhangi bir çatlak olmadığı ve malzemenin izotropik olduğu varsayılmıştır.

Sistem minimum enerji durumunu koruduğu için, başlangıçta, kırılmamış/sağlam sistemin enerji değişim oranı kırılan sistemden daha azdır. Başka bir deyişle, minimum enerji durumunu korumak isteyen sistem, kırılma modundaki enerji değişim oranı kırık olmayan sisteme göre daha düşük olursa kırılacaktır. Bu nedenle, kritik duruma, sağlam sistemin enerji değişim oranı ile kırılan sistemin enerji değişim oranı dengelenince ulaşılır (Karr ve Akçay, 2016).



Şekil 1. Muhtemel kırılma düzlemi (Potential fracture plane)

Kırılmadan önce üniform gerilmeye maruz kalan, mevcut boyutları (sırasıyla  $x_I$ ,  $x_{II}$ , ve  $x_{III}$  doğrultularında)  $l_I \times l_{II} \times l_{III}$  olan dikdörtgen kartezyan koordinat sisteminde sürekli bir ortamı göz önünde bulunduralım.  $x_I$ 'in ve  $x_{III}$ 'ün, sırasıyla maksimum ve minimum asal gerilme/gerinim doğrultularında olduğunu varsayalım. Birim hacimdeki toplam iş artışı, asal gerilmeler ve asal gerinimler cinsinden,

$$dW = \sigma_I d\varepsilon_I + \sigma_{II} d\varepsilon_{II} + \sigma_{III} d\varepsilon_{III} \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,  $\sigma_I \geq \sigma_{II} \geq \sigma_{III}$  geçerlidir.

Şekil 1'e istinaden,  $x_I - x_{III}$  düzlemindeki kırılma düzlemi normalinde oluşmaya başlayan çatlak ele alalım. Bu oluşum kayma modu (Mod II) kırılmasına tekabül etmektedir. Öncelikle, koordinat sistemini  $x_1$ ,  $x_2$  ve  $x_3$  olarak değiştirelim; öyle ki  $x_1$  eksenini  $x_I - x_{III}$  düzleminde ve kırılma düzlemine teğet doğrultuda yer alsın,  $x_2$  eksenini ise  $x_{II}$  ekseniniyle çakışsın. Bu durumda, kırılmamış sistemdeki birim hacim için plastik iş artışı

$$dW = \tau d\gamma + \sigma_{11} d\varepsilon_{11} + \sigma_{22} d\varepsilon_{22} + \sigma_{33} d\varepsilon_{33} \quad (3)$$

ile verilir. Eşitlik (3)'de gerilme ve gerinim bileşenleri, asal doğrultulardan ziyade yeni tanımlanmış koordinat sisteminde ifade edilmiştir. Bu durumda, kayma gerinimi  $\gamma = \gamma_{31}$ , kayma gerilmesi  $\tau = \tau_{31}$  olur.

Kırılan cismin enerji değişim oranı, kırılan hacim elemanının plastik iş artışı,  $dW^*$ , birim alandaki kritik eşdeğer enerji salınım oranı,  $\Gamma$ , ve varsa birim alandaki sürtünme enerjisi kayıpları,  $\mathcal{F}$ , ile ilişkilendirilebilir. Birim alandaki sürtünme enerjisi kayıpları

$$F = \mu \sigma_N l_{f,0} \quad (4)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir. Burada,  $\mu$  ve  $\sigma_N$ , sırasıyla, sürtünme katsayısını ve kırılma anındaki normal basma gerilmesini temsil etmektedir.

Şekil 1'de tasvir edilen taraflı kırılma düzlemi A alanına sahiptir:

$$A = \frac{l_{II} l_{III}}{\sin(\theta_f)} \quad (5)$$

Burada,  $\theta_f$  kırılma düzleminin boy,  $x_I$ , doğrultusuyla yaptığı açıdır.

Kırılan elemanla ilişkili birim hacimdeki plastik iş artışı ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$dW^* = \tau^* d\gamma^* + \sigma_{11}^* d\varepsilon_{11}^* + \sigma_{22}^* d\varepsilon_{22}^* + \sigma_{33}^* d\varepsilon_{33}^* \quad (6)$$

Kırılmanın, iş dönel bileşeninin kaybına karşılık geldiği varsayımıyla,  $\tau^* d\gamma^* = 0$  olur. Bununla birlikte, diğer asal gerilmeler ve gerinimler sınır koşullarıyla tutarlı olarak etkimeye devam eder ve  $\sigma_{22}^* d\varepsilon_{22}^* = \sigma_{22} d\varepsilon_{22}$ ,  $\sigma_{33}^* d\varepsilon_{33}^* = \sigma_{33} d\varepsilon_{33}$  geçerlidir. Ayrıca, kırılma yüzeylerine basma normal gerilmesi ( $\sigma_N$ ) etki ediyorsa, temas ve kayma nedeniyle ortaya çıkan birim alandaki sürtünme enerjisi kaybı da hesaba dahil edilmelidir.

Kırılmamış ve kırılmış sistemin enerji değişim oranlarının eşitlenmesiyle kritik koşul elde edilir:

$$l_I l_{II} l_{III} dW = [(\Gamma_{II} + F) \times A] d\gamma + l_I l_{II} l_{III} dW^* \quad (7)$$

Sınır koşullarının uygulanması ve gerekli sadeleştirmelerin yapılmasıyla kayma modu kırılması aşağıdaki kritik koşulla öngörülür:

$$e^{\varepsilon_I} \tau = \frac{C_{II} + \mu \sigma_N}{\sin \theta_f} \quad (8)$$

Burada,

$$C_{II} = \frac{\Gamma_{II}}{l_{I,0}} \quad (9)$$

$$\sigma_N = \frac{|\sigma_I + \sigma_{III}|}{2} + \frac{\sigma_I - \sigma_{III}}{2} \cos 2\theta_f \quad (10a)$$

$$\tau = \left( \frac{\sigma_I - \sigma_{III}}{2} \right) \sin 2\theta_f \quad (10b)$$

ile belirlenir.  $\tau$ , kayma gerilmesini temsil etmektedir.  $C_{II}$ , gerilme ile aynı birime sahiptir ve spesifik enerji salınım yoğunluğu (birim uzunluktaki birim alan başına denk gelen enerji salınım oranı) olarak adlandırılmıştır.  $\Gamma_{II}$  ise kayma modu (Mod II) kırılması için kritik eşdeğer enerjisi salınım oranını temsil eder.  $l_{I,0}$  karakteristik uzunluğu, mikro-yapısal kusurlar arasındaki ortalama mesafeyle ilişkilendirilebilir (Xia ve Shih, 1995). Bu nedenle, hem kritik eşdeğer enerjisi salınım oranı ( $\Gamma$ ) hem de karakteristik uzunluk ( $l_{I,0}$ ) malzemeye has değerlerdir.

Sürtünmenin etkin olduğu kayma modu kırılmasının gerçekleşmesi için  $\sigma_{III} < -2\sigma_I$  olmalıdır, böylece,  $\sigma_I + \sigma_{III} < 0$  olur. Eşitlik (10)'un Eşitlik (8)'e konulmasıyla

$$e^{\varepsilon_I} (\sigma_I - \sigma_{III}) \sin 2\theta_f \sin \theta_f + \mu [(\sigma_I + \sigma_{III}) + (\sigma_{III} - \sigma_I) \cos 2\theta_f] = 2C_{II} \quad (11)$$

elde edilir. Normal basma gerilmesinin kaybolacağı kırılma düzlemi açısını  $\theta_n$  ile ifade edelim.  $\theta_f \geq \theta_n$  olduğunda denklemin sol tarafındaki sürtünme terimi ortadan kalkar. Ayrıca, sürtünmenin olmadığı hallere tekabül eden kritik koşul, sürtünme katsayısı  $\mu = 0$  alınarak da elde edilebilir.

## 2.2 Maksimum Kayma Gerilmesi (MSS) Kriteri (Maximum Shear Stress (MSS) Criterion)

Maksimum Kayma Gerilmesi (MSS) kriteri, kırılmanın, kayma gerilmesinin maksimum olduğu düzlemde olacağını öngörmektedir. Dolayısıyla, kırılma, maksimum kayma gerilmesinin kritik değere ulaşmasıyla gerçekleşir ve

$$\frac{\sigma_I - \sigma_{III}}{2} = C_{MSS} \quad (12)$$

ile ifade edilir. Burada,  $C_{MSS}$  maksimum kayma gerilmesinin ulaştığı kritik değeri temsil etmektedir.



### 3. Kırılma Kriterlerinin Kalibrasyonu (Calibration of the Fracture Criteria)

#### 3.1. Malzeme (Material)

Al2024-T351 alaşımı uzay ve havacılık sanayisinde en çok kullanılan alüminyum alaşımı (Rodríguez-Millán vd., 2015) olmanın yanında, üstün darbe özelliklerine sahip olan ve balistik uygulamalar için de tercih edilen elyaf-metal laminatlarda (FMLs) en çok kullanılan iki metalden birisidir (Sadighi vd., 2012). Yukarıda bahsi geçen ve benzeri bir çok mühendislik uygulamasında tercih edilmesi ve dolayısıyla açık literatürde oldukça fazla deney verisi rapor edilmesi sebebiyle, bu çalışmada Al2024-T351 alaşımı göz önünde bulundurulmuştur.

Al2024-T351 alaşımına ait deney verileri, Bao ve Wierzbicki (2004), Bai ve Wierzbicki (2010) ve Khan ve Liu (2012) çalışmalarından temin edilmiştir. Yazarlar, kayma gerilmesi, burulma, tek eksenli ve çift eksenli çekme ve basma gerilmesi koşullarını içeren çok kapsamlı bir deney programı yürütmüştür. Farklı boyutlarda ve çeşitli geometrik şekillere sahip çok sayıda numune kullanıldığı için, numunelere ait detayların burada sunulması mümkün değildir. Dolayısıyla, deney programı yalnızca özet halinde Tablo 1'de sunulmuştur. Numune tip ve boyut detaylarıyla ilgilenen okuyucular, Bao ve Wierzbicki (2004), Bai ve Wierzbicki (2010) ve Khan ve Liu (2012) kaynaklarından detaylara erişebilirler.

Mevcut çalışma kapsamında kullanılan deney verileri Tablo 1'de listelenmiştir. Teorik modellerle uyumlu olması için yalnızca kayma modu (Mod II) kırılmasıyla sonuçlanan deney verileri göz önünde bulundurulmuştur. Gerilme üçeksenliliği ve Lode açısı/parametresi düzlem gerilme koşulları altında eşsiz bir şekilde ilişkilendirilebildiği için (Bai ve Wierzbicki, 2010), tabloda yalnızca gerilme üçeksenliliği verileri sunulmuştur. İlgilenen okuyucular yürütülen tüm deneylere ait verilerin derlemesine Lou vd. (2014)'den ulaşabilir. Deney verileriyle tutarlı olması için Al2024-T351 alaşımının plastik bölgedeki davranışı von-Mises akma kriteri ve Hollomon pekleşme bağıntısı kullanılarak tanımlanmıştır.

**Tablo 1.** Deney verileri (Experimental data) (Bai ve Wierzbicki, 2010; Khan ve Liu, 2012; Lou vd., 2014).

Deney numarası	Numune tipi	Yükleme durumu	Gerilme üçeksenliliği ( $\eta$ )	Eşdeğer kırılma gerinimi ( $\bar{\epsilon}_f$ )
#5	Dairesel silindir	Tek eksenli basma	-0.278	0.451
#6	Dairesel silindir	Tek eksenli basma	-0.234	0.380
#7	Dairesel silindir	Tek eksenli basma	-0.233	0.356
#8	Dairesel silindir	Tek eksenli basma	-0.224	0.341
#9	Çentikli dairese silindir	Tek eksenli basma	-0.248	0.622
#10	Özel geometri	Kayma	0.012	0.211
#11	Özel geometri	Çekme-Kayma	0.117	0.261
#12	Dairesel oyuklu levha	Tek eksenli çekme	0.343	0.310
#13	Kemik şekilli	Tek eksenli çekme	0.357	0.480
#14	Boru	Tek eksenli çekme	0.356	0.326
#16*	Boru	Burulma	0.000	0.288
#17	Boru	Çekme-Burulma	0.191	0.253
#18	Diktörtgen kesitli çubuk	Çift eksenli basma	-0.496	0.349

\* Bu veri kalibrasyon için kullanılmıştır (This datum is utilized for calibration).

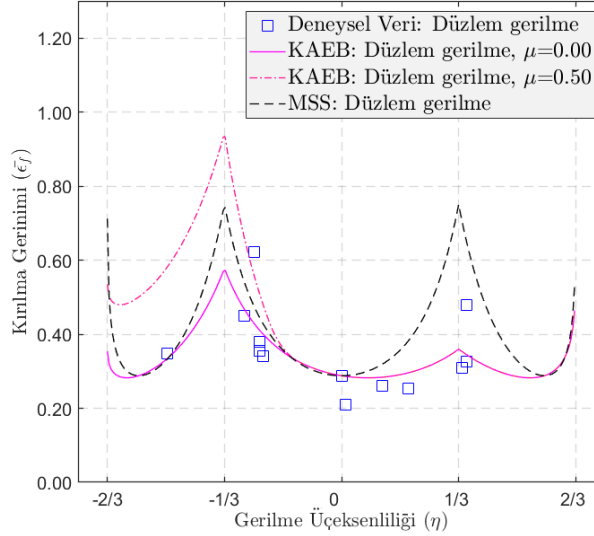
#### 3.2. Kalibrasyon (Calibration)

KAEB ve MSS kırılma kriterlerinin kalibrasyonu için bir adet deney verisi yeterlidir ve her iki kriterin kalibrasyonunda gerilme üçeksenliliği  $\eta = 0$ 'daki deney verisi (16 numaralı deney) kullanılmıştır. Kriterlere ait sabitler,  $C_{II} = 350.2$  MPa ve  $C_{MSS} = 354.5$  MPa şeklinde elde edilmiştir.

### 4. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmada, yakın zamanda geliştirilmiş Karr-Akçay Enerji Dengesi (KAEB) kriteri ve Maksimum Kayma Gerilmesi (MSS) kriteri deney sonuçları üzerinden karşılaştırılmış, her iki kriterin üstünlükleri ve eksiklikleri tartışılmıştır.

KAEB kriterinin ve MSS kriterinin uygulanmasıyla elde edilen Al2024-T351 alaşımına ait kırılma gezeneği Şekil 2'de sunulmuştur. KAEB kriteri iki farklı sürtünme katsayısı değeri için değerlendirilmiştir. Bunun sebebi sürtünme katsayısının kırılma gezeneği üzerindeki etkisini incelemektir. Sürtünme kuvvetini yenmek için daha fazla iş yapılması gerektiğinden, şekilden de görüldüğü üzere, sürtünme katsayısındaki artış kırılma gezeneğini yukarı taşımaktadır. Diğer bir deyişle, aynı gerilme koşulları altında fakat daha yüksek sürtünme kuvvetine maruz bir yapıda kırılmanın oluşumu için daha yüksek eşdeğer gerinime ulaşılması gerekmektedir.



**Şekil 2.** KAEB ve MSS kriterlerinin uygulanmasıyla elde edilen Al2024-T351 alaşımına ait düzlem gerilme kırılma gezeneği (Plane stress fracture loci of Al2024-T351 alloy utilizing KAEB and MSS criteria).

Şekil 2'den de görüldüğü üzere, her ne kadar göz önünde bulundurulmuş sünük kırılma kriterleri nitel olarak benzer davranış gösterse de, KAEB kriteri deney verilerine daha yakın sonuçlar sağlamaktadır. MSS kriteri, özellikle pozitif gerilme üçeksensliliği bölgesindeki kırılma gerinimi değerlerini olduğundan yüksek tahmin etmektedir. Bu durum, MSS kriterinin yalnızca Lode açısına/parametresine bağlı bir kriter olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, MSS kriteri kırılma gezeneğindeki asimetriyi de yakalayamamaktadır. Ek olarak, MSS kriterinin sürtünmeden bağımsız bir kriter olması, sürtünme kuvvetinin etkin olduğu durumlarda doğru sonuçlar vermemesine sebep olabilir. KAEB kriterine göre formülasyonunun oldukça yalın olması ve çözümü için iterasyon gerektirmemesi MSS kriterinin üstün taraflarıdır.

MSS kriterinin yalnızca Lode açısına/parametresine bağlı bir kriter olması temel zayıflıklarından bir tanesidir. KAEB kriteri ise gerilme üçeksensliliği ve Lode açısı/parametresi bağılıklarını özünde içermektedir. Bununla birlikte, her iki kriter de yalnızca bir adet kalibrasyon parametresi hesabını gerektirir. Sonuç olarak, kalibre edilen parametre sayısı ve modelin doğruluğu göz önünde bulundurulduğunda, KAEB kriterinin MSS kriterine göre daha avantajlı bir kriter olduğu gözlemlenmiştir.

Al2024-T351 alaşımı için cesaret verici sonuçların elde edilmiş olması, ileride yürütülecek çalışmalarda KAEB kriterinin diğer metalik malzemeler için de değerlendirilip pratik uygulamadaki etkinliğinin araştırılmasını teşvik etmektedir.

### Teşekkür (Acknowledgement)

Yazar, zaman ayırdıkları, kıymetli yorum ve önerilerde buldukları için makaleyi değerlendiren hakemlere teşekkür etmektedir. Ayrıca, konu akışı, bütünlüğü ve yazı dilini kontrol eden Doç. Dr. Bahadır Uğurlu'ya teşekkürü bir borç bilmektedir. Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: 41598.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

### Kaynaklar (References)

Abedini, A., Butcher, C., Worswick, M. J., 2017. Fracture characterization of rolled sheet alloys in shear loading: Studies of specimen geometry, anisotropy, and rate sensitivity. *Experimental Mechanics*, 57, 75-88.

- Bai, Y., Wierzbicki, T., 2008. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. *International Journal of Plasticity*, 24, 1071-1096.
- Bai, Y., Wierzbicki, T., 2010. Application of extended Mohr–Coulomb criterion to ductile fracture. *International Journal of Fracture*, 161, 1-20.
- Bao, Y., Wierzbicki, T., 2004. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46, 81-98.
- Barsoum, I., Faleskog, J., 2007. Rupture mechanisms in combined tension and shear—Experiments. *International Journal of Solids and Structures*, 44, 1768-1786.
- Charoensuk, K., Panich, S., Uthaisangsuk, V., 2017. Damage initiation and fracture loci for advanced high strength steel sheets taking into account anisotropic behaviour. *Journal of Materials Processing Technology*, 248, 218-235.
- Cockcroft, M. G., Latham, D. J., 1968. Ductility and the workability of metals. *Journal of the Institute of Metals*, 96, 33-39.
- Dunand, M., Mohr, D., 2011. Optimized butterfly specimen for the fracture testing of sheet materials under combined normal and shear loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 78, 2919-2934.
- Eringen, A. C., 1980. *Mechanics of continua*. Robert E. Krieger Publishing Company: Melbourne.
- Fourmeau, M., Børvik, T., Benallal, A., Hopperstad, O. S., 2013. Anisotropic failure modes of high-strength aluminium alloy under various stress states. *International Journal of Plasticity*, 48, 34-53.
- Frodal, B. H., Pedersen, K. O., Børvik, T., Hopperstad, O. S., 2017. Influence of pre-compression on the ductility of AA6xxx aluminium alloys. *International Journal of Fracture*, 206, 131-149.
- Griffith, A. A., 1921. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 221, 163-198.
- Gurson, A. L., 1977. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 99, 2-15.
- Habibi, N., Ramazani, A., Sundararaghavan, V., Prah, U., 2018. Failure predictions of DP600 steel sheets using various uncoupled fracture criteria. *Engineering Fracture Mechanics*, 190, 367-381.
- Hancock, J. W., Mackenzie, A. C., 1976. On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 24, 147-160.
- Irwin, G. R., 1948. Fracture dynamics. *Fracturing of metals: A seminar on the fracturing of metals held during the twenty-ninth national metal congress and exposition, içinde (s. 147-166)*. American Society for Metals: Cleveland.
- Irwin, G. R., 1957. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, 24, 361-364.
- Jia, Y., Bai, Y., 2016a. Experimental study on the mechanical properties of AZ31B-H24 magnesium alloy sheets under various loading conditions. *International Journal of Fracture*, 197, 25-48.
- Jia, Y., Bai, Y., 2016b. Ductile fracture prediction for metal sheets using all-strain-based anisotropic eMMC model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 115, 516-531.
- Jia, Y., Ghazali, S., Bai, Y., 2017. Application of eMMC model to fracture of metal sheets. *Proceedings of the Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution, Cilt 8, içinde (s. 49-55)*. Springer International Publishing: Cham.
- Johnson, G. R., Cook, W. H., 1985. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21, 31-48.
- Karr, D.G., Akçay, F.A., 2016. A criterion for ductile fracture based on continuum modeling of energy release rates. *International Journal of Fracture*, 197, 201-212.
- Khan, A. S., Liu, H., 2012. A new approach for ductile fracture prediction on Al 2024-T351 alloy. *International Journal of Plasticity*, 35, 1-12.
- Kiran, R., Khandelwal, K., 2013a. A micromechanical model for ductile fracture prediction in ASTM A992 steels. *Engineering Fracture Mechanics*, 102, 101-117.
- Kiran, R., Khandelwal, K., 2013b. Experimental studies and models for ductile fracture in ASTM A992 steels at high triaxiality. *Journal of Structural Engineering*, 140, 04013044.
- Korkolis, Y. P., Kyriakides, S., 2008. Inflation and burst of anisotropic aluminum tubes for hydroforming applications. *International Journal of Plasticity*, 24, 509-543.
- Li, Y., Luo, M., Gerlach, J., Wierzbicki, T., 2010. Prediction of shear-induced fracture in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 1858-1869.
- Luo, M., Wierzbicki, T., 2010. Numerical failure analysis of a stretch-bending test on dual-phase steel sheets using a phenomenological fracture model. *International Journal of Solids and Structures*, 47, 3084-3102.
- Lou, Y., Huh, H., 2013. Extension of a shear-controlled ductile fracture model considering the stress triaxiality and the Lode parameter. *International Journal of Solids and Structures*, 50, 447-455.
- Lou, Y., Huh, H., 2013. Extension of a shear-controlled ductile fracture model considering the stress triaxiality and the Lode parameter. *International Journal of Solids and Structures*, 50, 447-455.
- Lou, Y., Yoon, J. W., Huh, H., 2014. Modeling of shear ductile fracture considering a changeable cut-off value for stress triaxiality. *International Journal of Plasticity*, 54, 56-80.
- Malcher, L., Pires, F. A., De Sá, J. C., 2014. An extended GTN model for ductile fracture under high and low stress triaxiality. *International Journal of Plasticity*, 54, 193-228.
- McClintock, F. A., 1968. A criterion for ductile fracture by the growth of holes. *Journal of Applied Mechanics*, 35, 363-371.
- Mohr, D., Marcadet, S. J., 2015. Micromechanically-motivated phenomenological Hosford–Coulomb model for predicting ductile fracture initiation at low stress triaxialities. *International Journal of Solids and Structures*, 67, 40-55.
- Nahshon, K., Hutchinson, J. W., 2008. Modification of the Gurson model for shear failure. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 27, 1-17.
- Needleman, A., Tvergaard, V., 1991. An analysis of dynamic, ductile crack growth in a double edge cracked specimen. *International Journal of Fracture*, 49, 41-67.

- Orowan, E., 1945. Notch brittleness and the strength of metals. *Transactions of the Institution of Engineers and Shipbuilders in Scotland*, 89, 165–215.
- Orowan, E., 1949. Fracture and strength of solids. *Reports on Progress in Physics*, 12, 185-232.
- Osovski, S., Srivastava, A., Ponson, L., Bouchaud, E., Tvergaard, V., Ravi-Chandar, K., Needleman, A., 2015. The effect of loading rate on ductile fracture toughness and fracture surface roughness. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 76, 20-46.
- Papasidero, J., Doquet, V., Mohr, D., 2014. Determination of the effect of stress state on the onset of ductile fracture through tension-torsion experiments. *Experimental Mechanics*, 54, 137-151.
- Papasidero, J., Doquet, V., Mohr, D., 2015. Ductile fracture of aluminum 2024-T351 under proportional and non-proportional multi-axial loading: Bao-Wierzbicki results revisited. *International Journal of Solids and Structures*, 69, 459-474.
- Park, N., Huh, H., Nam, J. B., Jung, C. G., 2015. Anisotropy effect on the fracture model of DP980 sheets considering the loading path. *International Journal of Automotive Technology*, 16, 73-81.
- Rice, J. R., 1968. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, 35, 379–386.
- Rice, J. R., Tracey, D. M., 1969. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields\*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 17(3), 201–217.
- Rodríguez-Millán, M., Vaz-Romero, Á., Arias, Á., 2015. Failure behavior of 2024-T3 aluminum under tension-torsion conditions. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(11), 4657-4663.
- Sadighi, M., Alderliesten, R. C., Benedictus, R., 2012. Impact resistance of fiber-metal laminates: A review. *International Journal of Impact Engineering*, 49, 77-90.
- Shah, O. R., Tarfaoui, M., 2017. Determination of mode I & II strain energy release rates in composite foam core sandwiches. An experimental study of the composite foam core interfacial fracture resistance. *Composites Part B: Engineering*, 111, 134-142.
- Tvergaard, V., 1981. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions. *International Journal of Fracture*, 17, 389–407.
- Tvergaard, V., Needleman, A., 1984. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metallurgica*, 32, 157-169.
- Valoppi, B., Bruschi, S., Ghiotti, A., Shivpuri, R., 2017. Johnson-Cook based criterion incorporating stress triaxiality and deviatoric effect for predicting elevated temperature ductility of titanium alloy sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*, 123, 94-105.
- Wang, K., Luo, M., Wierzbicki, T., 2014. Experiments and modeling of edge fracture for an AHSS sheet. *International Journal of Fracture*, 187, 245-268.
- Wang, K., Wierzbicki, T., 2015. Experimental and numerical study on the plane-strain blanking process on an AHSS sheet. *International Journal of Fracture*, 194, 19-36.
- Wierzbicki, T., Bao, Y., Lee, Y. W., Bai, Y., 2005. Calibration and evaluation of seven fracture models. *International Journal of Mechanical Sciences*, 47, 719–743.
- Wierzbicki, T., Xue, L., 2005. On the effect of the third invariant of the stress deviator on ductile fracture. *Impact and Crashworthiness Laboratory, Teknik Rapor 136*.
- Xia, L., Shih, C. F., 1995. Ductile crack growth–I. A numerical study using computational cells with microstructurally-based length scales. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 43, 233–259.



## SALDA GÖLÜ HAVZASI GÜNEYİNİN (YEŞİLOVA/BURDUR) HİDROJEOLJİSİ VE HİDROJEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELEMESİ

Simge VAROL<sup>1\*</sup>, Mutlu KÜÇÜK<sup>2</sup>, Ayşen DAVRAZ<sup>2</sup>, Şehnaz ŞENER<sup>2</sup>, Erhan ŞENER<sup>3</sup>, Fatma AKSEVER<sup>2</sup>,  
Bülent KIRKAN<sup>1</sup>, Ahmet TOKGÖZLÜ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Su Enstitüsü, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fak., Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>3</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Uzaktan Algılama Merkezi, Isparta, Türkiye

<sup>4</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fak., Coğrafya Bölümü, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler Öz

*Hidrojeoloji,*

*Hidrojeokimya,*

*Su Kalitesi,*

*Yeşilova,*

*Salda Gölü.*

Bu çalışmada Salda Gölü havzasının güneyinde bulunan su kaynaklarının jeolojik, hidrolojik, hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal özellikleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bölgede Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı kayalar yayılım göstermektedir. Çalışma alanındaki litolojik birimlerden alüvyon ve kireçtaşları en önemli akiferlerdir. Çalışma alanındaki ortalama yağış miktarı 524.03 mm olup yağışın yaklaşık 368.55 mm'si buharlaşmaktadır. İnceleme alanındaki suların Mg-HCO<sub>3</sub>, Mg-Ca-HCO<sub>3</sub>, Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> ve Mg-Na-HCO<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub> sular fasiyesindedir. Yeraltısularında tespit edilen Mg artışı, Marmaris peridotitleri ile Kızılcadağ ofiyolit ve melanji ile kaya-su etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Suların sulama suyu olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiş ve bazı örneklerin sulama suyu olarak kullanımı uygun bulunmamıştır. Bölgede tarımsal faaliyetlerle ilişkili olarak S11 örneğinde nitrat içeriğinin sınır değeri aştığı tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada sular da mikrobiyolojik kirlenme ve Al, As, Cr ve Fe, gibi iz element içeriklerini belirlemeye yönelik araştırmalar da yapılmıştır. Su örneklerinin içme suyu olarak kullanılabilirliği ulusal ve uluslararası standartlarla karşılaştırıldığında, S2 no'lu örnek Al, S14 ve S15 no'lu örnekler As, S1-S3, S5-S15 no'lu örnekler Cr, S1 ve S5 no'lu örneklerin ise Fe bakımından içme suyu olarak kullanılmayacağı görülmektedir. Bu artışların hem jeojenik hem de antropojenik kökenli olduğu düşünülmektedir.

## INVESTIGATION OF THE HYDROGEOLOGY AND HYDROGEOCHEMICAL PROPERTIES OF THE SOUTH OF THE SALDA LAKE BASIN (YEŞİLOVA/BURDUR)

### Keywords

*Hydrogeology,*

*Hydrogeochemistry,*

*Water Quality,*

*Yeşilova,*

*Salda Lake.*

### Abstract

In this study, it has been investigated as detailed geological, hydrological, hydrogeological and hydrochemical features of water sources in the south of the Salda Lake basin. Mesozoic and Cenozoic rocks are spread in the region. Alluvium and limestones are the most important aquifers from the lithological units in the study area. The mean rainfall amount for the study area is 524.03 mm and evaporation is 368.55 mm. Groundwaters and surface waters are Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> and Mg-Ca-HCO<sub>3</sub> facies. The increase of Mg are originated from Marmaris peridotite and Kızılcadağ ophiolite and melange related to water-rock interaction. Some of the waters in the study area are not suitable for use as irrigation water. Agricultural activity is most important pollution in the study area. Therefore, it was found that nitrate content exceeds the limit value in groundwater samples of S11. In addition, studies have been conducted to determine microbiological contamination and heavy metal contents such as Al, As, Cr and Fe. When compared with the national and international standards for the usability of the water samples as the drinking water, It can be seen that the sample S2 due to Al, the samples S14 ve S15 due to As, the samples S1-S3, S5-S15 due to Cr and the samples S1 and S5 due to Fe can not be used as drinking water. These increases are thought to be both geogenic and anthropogenic.

**Alıntı / Cite**

Varol S., Küçük, M., Davraz A., Şener Ş., Şener E., Aksever F., Kırkan B., Tokgözlü A., (2020). Salda Gölü Havzası Güneyinin (Yeşilova/Burdur) Hidrojeolojisi ve Hidrojeokimyasal Özelliklerinin İncelemesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 74-90.

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

S. Varol, 0000-0002-1905-9454  
 M. Küçük, 0000-0001-5387-9299  
 A. Davraz, 0000-0003-2442-103x  
 Ş. Şener, 0000-0003-3191-2291  
 E. Şener, 0000-0001-6263-8366  
 F. Aksever, 0000-0002-9907-8451  
 B. Kırkan, 0000-0003-3462-0681  
 A. Tokgözlü, 0000-0003-2447-7068

**Makale Süreci / Article Process**

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	21.05.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	17.07.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	18.07.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

**1. Giriş (Introduction)**

Su, yüzyıllar boyunca tüm medeniyetler için çok önemli bir doğal kaynak olmuş, bütün büyük uygarlıklar su kenarında kurulmuştur. Teknolojinin ilerlemesi ile sudan faydalanma şekil ve oranlarının artması, su kaynaklarının içme-kullanma, sulama suyu, enerji üretimi gibi pekçok amaç için geliştirilebilmesi, ülkelerin ekonomik kalkınmasında suyun vazgeçilmez bir yer edinmesinde büyük rol oynamıştır. Bugün “gelişmiş ülke” olarak tanımlanabilen pek çok ülke bu seviyelere, ülkelerinin su potansiyelinden azami faydayı sağlayarak ulaşmışlardır (Akkaya ve diğ. 2006). Teknolojinin ilerlemesi, su kaynaklarından optimum faydanın sağlanmasına yardımcı olmakla birlikte, bu ilerlemeye paralel olarak sanayileşmenin ve şehirleşmenin de artması, beraberinde “çevre kirliliği” ve özellikle “su kirliliği” konularını gündeme getirmiştir. Su kirliliğinin giderek önemli boyutlara ulaşması, ülkeleri bu konuda ciddi önlemler almaya zorlamış, bu da bu alanda pek çok mevzuatın oluşması sonucunu doğurmuştur (Akkaya ve diğ. 2006).

Günümüzde önemli su kaynaklarından olan sulak alanlar ise içerisinde barındırdığı canlı hayatı ile de başlı başına bir ekosistemdir. Sulak alan ekosistemleri besin zincirinde yer alan ve ilk basamağını oluşturan üretici gruptan, son basamağındaki tüketici gruba kadar oldukça farklı canlı türlerinin yaşamlarını devam ettirmek için kullandıkları ortamlardır. Bu ekosistemlerdeki en son basamak olan tüketici grubun yine son halkasını da insan oluşturmaktadır. Doğal hayata hizmet eden önemli su kaynaklarından olan sulak alanların korunması ve gelecek kuşaklara sağlıklı şekilde iletilmesi bu bakımdan çok daha fazla önem taşımaktadır. Sulak alanları koruyabilmek için ise öncelikli olarak sulak alanların doğal yapılarının korunması gerekmektedir. Bu amaçla gelecekteki kullanımlar için yeterli miktar ve kalitede suyun olup olmadığını belirlemek ve bu sırada karşılaşılabilecek havza problemlerini çözmek amacıyla hidrojeolojik havza etütlerinin ve hidrojeokimyasal araştırmaların yapılarak suların kalitesi ve kullanım alanlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Konunun önemi ilişkili olarak seçilen Salda Gölü havzası güneyi de, Salda Gölü ile birlikte sulak alan havzasının bir bölümünü içine almaktadır. Bölgedeki su kaynakları hem sulak alanın canlılığını korumakta, hem de yöre halkının çeşitli içme sulama ve kullanma faaliyetlerine hizmet etmektedir. Bu nedenle su kaynaklarının miktarının belirlenmesi yanısıra hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenerek, kalitesi ve kullanım alanlarının belirlenmesi önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, Salda Gölü havzası güneyinin jeoloji, hidroloji, hidrojeoloji ve hidrojeokimyasal incelemelerinin yapılarak, inceleme alanı içerisinde bulunan su kaynaklarının mevcut durumu ve sürdürülebilir kullanım için gerekli bilgilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, ayrıca ülkemizin önemli sulak alan havzalarından bir tanesi olan Salda Gölü havzasının bir kısmını da içine alan alandaki su kaynaklarında aşırı su kullanımına ve çeşitli kirlilik parametrelerine bağlı ortaya çıkan sorunlar nedeniyle su kaynaklarının fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenerek suların kalitesinin ve kullanım alanlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

**2. Bilimsel Yazın Taraması (Literature Survey)**

İnceleme alanı ve yakın çevresinin jeolojik ve biyolojik yapısı ile ilgili geçmiş dönemlerde yapılan birkaç çalışma dışında güncel ve detaylı araştırmalar bulunmamaktadır. Özellikle inceleme alanının jeolojisi ise birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Ardel (1951), çalışmada Salda Gölü ve çevresini jeomorfolojik olarak incelemiştir. Gölün ofiyolitler arasında yer aldığını ve bu ofiyolitlerin yer yer altere olarak serpantinleştiğini, sadece dik yamaçlı Kale Tepe’ de (1472 m) kalkerlerin yer aldığını belirtmiştir. Altınlı (1955), Salda Gölü’nün yapısal jeolojisi hakkında çalışma yapmıştır. Gölün antiklinal sahasında yer aldığını ve kıvrım eksenlerinin alçaldığı bir bölgede çevredeki suların burada toplanmasıyla meydana geldiğini belirtmiştir. Yalçınlar (1959), Salda Gölü’nün, dairevi bir yapı oluşturan dağların arasında, merkezi kısımda yer aldığını belirtmiştir. Bu yapıyı bir



kubbeye benzetmiştir. Bu kubbe yapısını oluşturan ofiyolitik serinin Mesozoyik kalker tabakalarla birlikte bulunduğunu ve Mesozoyik yaşta olduklarını ileri sürmüştür. Erentöz (1974), Salda Gölü ve çevresinin peridotitlerden meydana geldiğini ve bunların yer yer Mesozoyik komprehensif kalkerlerle birlikte bulunduğunu belirtmiştir. Akkuş (1987), bölgenin jeomorfolojik yapısını araştırmış ve Salda Gölü'nün tektonik kökenli bir göl olduğu, Neojen sonunda oluşmaya başladığı ve daha sonra meydana gelen tektonik hareketlerle bugünkü şeklini aldığını belirtmiştir. Yazara göre çalışma alanı Anadolu'nun tektonik birlikleri sınıflamasında Toroslar Tektonik Birliği içerisinde yer almaktadır. Bugünkü yapı Alp orojenezi ile kazanılmıştır. Schmid, (1987), araştırmasında tatlı su göllerindeki Mg getirimini ve buna bağlı olarak da Salda Gölü'ndeki Mg kaynağını konu almıştır. Tatlı su ortamlarındaki Mg'un kaynağının ortama magmatik çözeltilerin katılması yada serpantin ve ultrabazik kayaların içinde dolaşan ve onların alterasyonu ile Mg'ca zenginleşen yüzey sularının ortama gelmesi şeklinde olduğunu savunmuştur. Taymaz ve Price (1992), çalışma alanına ait genelleştirilmiş jeoloji haritasını hazırlamışlardır. Braithwaite ve Zedef (1996), bu çalışmalarında alkali bir göl olan Salda Gölü'nde hidromanyezit, stromatolitleri ve sedimentleri incelemişlerdir. Çalışmacılar kıyı boyunca gözlenen mikrobiyal stromatolitlerin, biyofilmlerle ilişkili diyatom ve syanobakteri mikroflorası içermekte olduğunu belirtmişlerdir. Akyürek vd. (1996) çalışma alanı ile ilgili olarak su kalitesi ve sucul ekosisteme ilişkin çalışmalardan biri olan, "Salda Gölü'nün fizikokimyasal ve temel biyolojik özelliklerinin tespiti ile akuakültür imkânlarının araştırılması" isimli projede Salda Gölü'nde bulunan balık, plankton ve bentik türler ile göl suyunun özelliklerini tespit ederek gölde kafes balıkçılığı imkânlarını araştırmışlardır.

Kazancı vd. (1999, 2000) tarafından hazırlanan bir başka çalışma ile gölün limnolojik yapısının ve biyolojik karakterinin gelecekte korunmasına yönelik tavsiyelerde bulunulmuştur. Süner vd., (2000), Bölgedeki güncel hidromanyezit oluşumlarının jeokimyasal, endüstriyel ve çevresel niteliklerini araştırmışlar ve yine çalışma alanının jeolojisi ile ilgili olarak litolojik birimleri alloktan ve otokton konumlu olarak ayırtlamışlardır. Yeşilova-Tefenni ofiyolitleri, Kızılcaadağ melanji, Yandağ kireçtaşlarını alloktan birimler olarak, Çameli formasyonu, yamaç molozları ve alüvyon birimlerini ise otokton birimler olarak değerlendirmişlerdir. BİÇDR (2010), Burdur ili çevre durumunun detaylı olarak anlatıldığı raporda Burdur il sınırları ve yine Burdur Kapalı havzası içerisinde yer alan Salda Gölü sulak alan alt havzası ve içerisinde bulunan yerleşim alanlarının çevre durumları anlatılmıştır. Yılmaz ve Kuşçu (2012), tarafından yapılan farklı bir çalışmada ise göl ve çevresindeki manyezit oluşumlarının sedimanter oluşumlu masif manyezit yatakları türünde gelişim gösterdiği ve halen bu tip güncel manyezit çökelinin devam ettiği belirtilmiştir. Lise vd., (2013), tarafından Orman ve Su İşleri Bakanlığı Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü desteği ile Salda Gölü sulak alanında yapılmış olan en güncel ve kapsamlı araştırmayı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma Salda Gölü sulak alan alt havzası biyolojik çeşitliğinin belirlenmesine yönelik yapılmıştır. Hazırlanan raporda Salda Gölü alt havzasında bitkisel ve hayvansal biyolojik tür çeşitliliği araştırılmış ve Salda Gölü'ndeki biyoekolojik kalite durumu ortaya konmuştur.

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

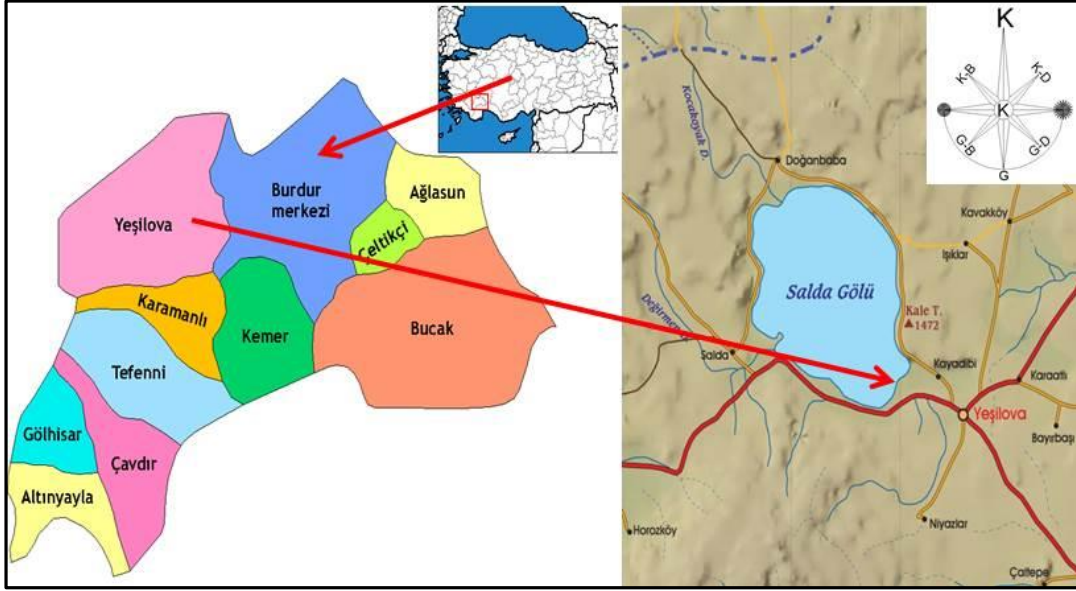
#### 3.1. İnceleme Alanının Tanıtılması (The Study Area)

İnceleme alanı olarak seçilen bölge, Burdur Gölü kapalı havzası sınırları içinde yer almaktadır (Şekil 1). Çalışma alanı aynı zamanda Salda Gölü beslenme havzası içerisinde yer almaktadır. Salda Gölü havzası, Neojen sonunda ortaya çıkan tektonizma etkisiyle oluşmuş, kapalı havza özelliği taşıyan bir çöküntü. Bu bölgedeki en önemli yerleşim alanı Burdur ili Yeşilova ilçe merkezidir. Diğer yerleşim alanları ise Kayadibi ve Niyazlar köyleridir. İlçe doğusunda Burdur ili, batısında Denizli ili Acıpayam ilçesi, güneyinde Burdur ili Karamanlı ilçesi, kuzeyinde ise Denizli ili Çardak ilçesi ve Afyon ili Başmakçı ilçesi ile çevrilidir. Yüzölçümü 1351 km<sup>2</sup>'dir. Yeşilova ilçesi Ege ve Akdeniz Bölgeleri arasında bir alan olup, 37-38 kuzey enlemi, 29-30 doğu boylamı arasında, rakımı 1200 metredir. İlçe Göller Bölgesinin karakteristik özelliklerini taşımaktadır. Yeşilova ilçesi Burdur iline 60 km, Denizli iline 94 km ve Antalya iline 160 km mesafe uzaklıktadır (<http://www.yesilova.gov.tr/ilcemiz-tarihcesi>).

Ayrıca yine çalışma alanı içerisinde 1139 m kotunda ve 184 m'lik maksimum derinliği ile Türkiye'nin en derin göllerinden birisi olan Salda Gölü bulunmakta ve Yeşilova ilçe merkezine 4 km uzaklıkta yer almaktadır. Salda Gölü beslenme havzası genel yapısı itibarıyla suları denize ulaşmayan kapalı havza veya kapalı bir hidrolojik sistem özelliğini taşımaktadır. Genellikle yağışlarla havzaya düşen su, yaz mevsiminde büyük kısmı kuruyan dereler ile havzanın en derin yeri olan Salda Gölü çanağında toplanmakta ve bu alanda toplanan sular Salda Gölü'nü oluşturmaktadır. Çalışma alanı Salda Gölü'nün güney kesimi ile birlikte yaklaşık 154 km<sup>2</sup> dir.

İnceleme alanı içinde en yaygın bitki örtüsünü ormanlar oluşturmaktadır. Salda Gölü bölgenin iklim, toprak ve bitki örtüsünün işlevlerini yerine getirmede dengeleyici bir rol oynamaktadır. Göl havzasında olduğu gibi inceleme alanında da içme ve kullanma sularının büyük bir kısmı doğal kaynaklardan karşılanmaktadır. Özellikle dereler tarımsal sulama amaçlı kullanılmaktadır. Havza içerisinde yer alan Salda Gölü'nün suyu ise tarımsal sulama için uygun olmayan sular sınıfında yer almaktadır. Ayrıca havzada bulunan Salda Gölü'nün doğal yapısı, peyzaj

güzelliği, su kalitesi ve çevresel yapının uygunluğu nedeniyle rekreasyonel özelliği son derece yüksektir (Lise vd. 2013).



**Şekil 1.** Çalışma alanının yerbulduru haritası (ölçeksiz) (Location map of the study area (without scale))

### 3.2. Çalışma Yöntemleri (Methods)

Salda Gölü havzası güneyinin (Yeşilova/Burdur) hidrojeolojisi ve hidrojeokimyasal özelliklerinin incelenmesi amacıyla yapılan araştırmalar; jeoloji, hidroloji, hidrojeoloji ve hidrokimyasal çalışmalar başlıkları altında toplanmıştır. Çalışma alanı 1/25.000 ölçekli Denizli N23-a2, b1 ve Denizli M23-c4, d3 no'lu paftalarda yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında hazırlanan jeoloji ve hidrojeoloji haritaları 1/25.000 ölçekli ayrıntıda incelenmiş ve sunulmuştur. **Jeoloji;** İnceleme alanının jeolojisini incelemek amacıyla öncelikle 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritalar üzerinde belirlenmiş ve jeoloji haritası daha önceki çalışmalardan ve arazi çalışmalarından yararlanılarak hazırlanmıştır. **Hidroloji;** Çalışmanın bu bölümünde, inceleme alanı olan Salda Gölü havzasının güneyi ve çevresindeki Devlet Meteoroloji İstasyonlarından alınan uzun yıllara ait ölçüm verileri kullanılmış ve su bilançosu elemanları olan yağış ve buharlaşma değerleri belirlenmiştir. Bununla beraber, çalışma alanı ve çevresindeki meteoroloji istasyonlarının yıllık toplam yağış verilerinden yararlanılarak bu veriler yardımıyla hazırlanan eklenik sapma grafikleri ile bölgede iklim değişim trendi yorumlanmıştır. Buharlaşmanın çalışma alanındaki potansiyel ve gerçek buharlaşma değerlerini hesaplanmak için ise Thornthwaite yöntemi kullanılmıştır. **Hidrojeoloji;** Bu bölümünde inceleme alanında bulunan su noktaları araştırılmış, jeolojik birimler hidrojeolojik özelliklerine göre değerlendirilerek hidrojeoloji haritası hazırlanmış ve alandaki akiferler tanımlanmıştır. **Hidrojeokimya;** Çalışma alanında bulunan yüzey ve yeraltısularının hidrojeokimyasal özellikleri, kalitesi ve kullanım koşullarının tespiti için bölgeyi temsil edecek şekilde Salda Gölü havzası güneyindeki kaynak, sondaj kuyuları, dere ve göl sularından Haziran-2015 döneminde 15 ayrı noktadan su örnekleri alınmıştır. Alınan su örneklerinin fizikokimyasal özellikleri (in-situ ve lab. Analizleri ile), kirlilik parametreleri, kalite, kullanım koşulları ve su tipleri belirlenmiştir. Su örneklerinin kimyasal analizleri; 72 adet iz element analizi Bureau Veritas (Acme-Kanada) Laboratuvarında (Kanada) ve majör iyon analizleri Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası Laboratuvarlarında, bakteriyolojik analizleri Isparta İl Gıda Kontrol Laboratuvarında yapılmıştır (Haziran 2015). Ayrıca, arazide YSI marka çok parametrelili portatif su kalitesi ölçüm cihazı kullanılarak suların sıcaklık (T), elektriksel iletkenlik (EC), çözülmüş oksijen (DO), redoks potansiyeli (Eh) ve hidrojen iyonu konsantrasyonu (pH) değerleri yerinde ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar farklı diyagramlar ve haritalar üzerinde yorumlanarak çeşitli kullanım alanlarına göre sınıflandırılmıştır.

## 4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

### 4.1. Genel Jeoloji (Geology)

İnceleme alanındaki litolojik birimlerin genel özelliklerinin, diğer birimler ile olan alt-üst ilişkilerinin ve yapısal özelliklerinin belirlenmesi çalışmaları için öncelikle daha önce yapılmış bu araştırmalardan yararlanılmıştır. Bu çalışmaların ışığında arazi gözlemleri yapılarak 1/25.000 ölçekli jeoloji haritası derlenmiş ve Corel Draw programı kullanılarak bilgisayar ortamında çizilmiştir (Şekil 2).

Çalışma alanında Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı kayalar yayılım göstermektedir. Bu birimler otokton ve allokon

konumlu olarak iki grupta incelenmiştir (Tablo 1; Şekil 2). Otokton birim; güncel sedimanların oluşturduğu alüvyon (Qal)' dur. Allohton birimler ise; Kretase yaşlı harzburjit ve serpantinleşmiş harzburjitlerden oluşan Marmaris peridotiti (Kmo) (Şenel vd., 1997), açık yeşilimsi gri, açık yeşil ve kahverengimsi renkli yaygın olarak serpantinleşmiş dunitlerden oluşan Dunit üyesi (Kmod), Ofiyolitli melanj ve olistostromla temsil edilen Üst Senoniyen yaşlı Kızılcaadağ ofiyolitli melanj ve olistostromu (Kkzm), Gülbahar napına ait radyolarit ve çört ara seviyeli çörtlü mikritlerden oluşan Jura-Kretase yaşlı Orhaniye formasyonu (JKo) ve Orta Triyas-Liyas yaşlı yersel megaladonlu, rekristalize kireçtaşlarından oluşan Dutedere kireçtaşları (TRJd)' dir (Şenel vd., 1997).

**Tablo 1.** İnceleme alanında yayılım gösteren litolojik birimler ve yaşları (Lithological units in the study area and their ages)

JEOKRONOLOJİ			LİTOSTRATİGRAFI		LİTOLOJİ
Zaman	Devir	Devre	Formasyon	Simge	Açıklamalar
SENOZOYİK	Kuvaterner		Alüvyon	Qal	Kum, çakıl, çamur ve blok birikintileri.
		MESOZOYİK	Üst Senoniyen	Kızılcaadağ ofiyolitli melanj ve olistostromu	Kkzm
Marmaris Peridotiti Dunit Üyesi	Kmo Kmod			Yer yer serpantinleşmiş ultramafik kayalar, harzburjit, serpantin, Bol olivinli serpantinleşmiş dunitler	
Liyas	Orhaniye formasyonu		JKo	Bazik volkanit, radyolarit, çört ara düzeyli mikrit,	
	Dutedere Kireçtaşları		TRJd	Yersel megaladonlu rekristalize kireçtaşları	
Jura					
Triyas					

#### 4.2. Hidroloji (Hydrology)

Çalışma alanı için eş yağış eğrileri yöntemine göre belirlenen ortalama yağış miktarı 316.39 mm'dir. 154 km<sup>2</sup>'lik çalışma alanına düşen ortalama yıllık yağış miktarı 48.72x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/yıl olarak hesaplanmıştır.

Buharlaşma ile gerçekleşen boşalım miktarı Thornthwaite yöntemi ile 324.84 mm gerçek buharlaşma (Etr) ile 50.02x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/yıl olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3. Hidrojeoloji (Hydrogeology)

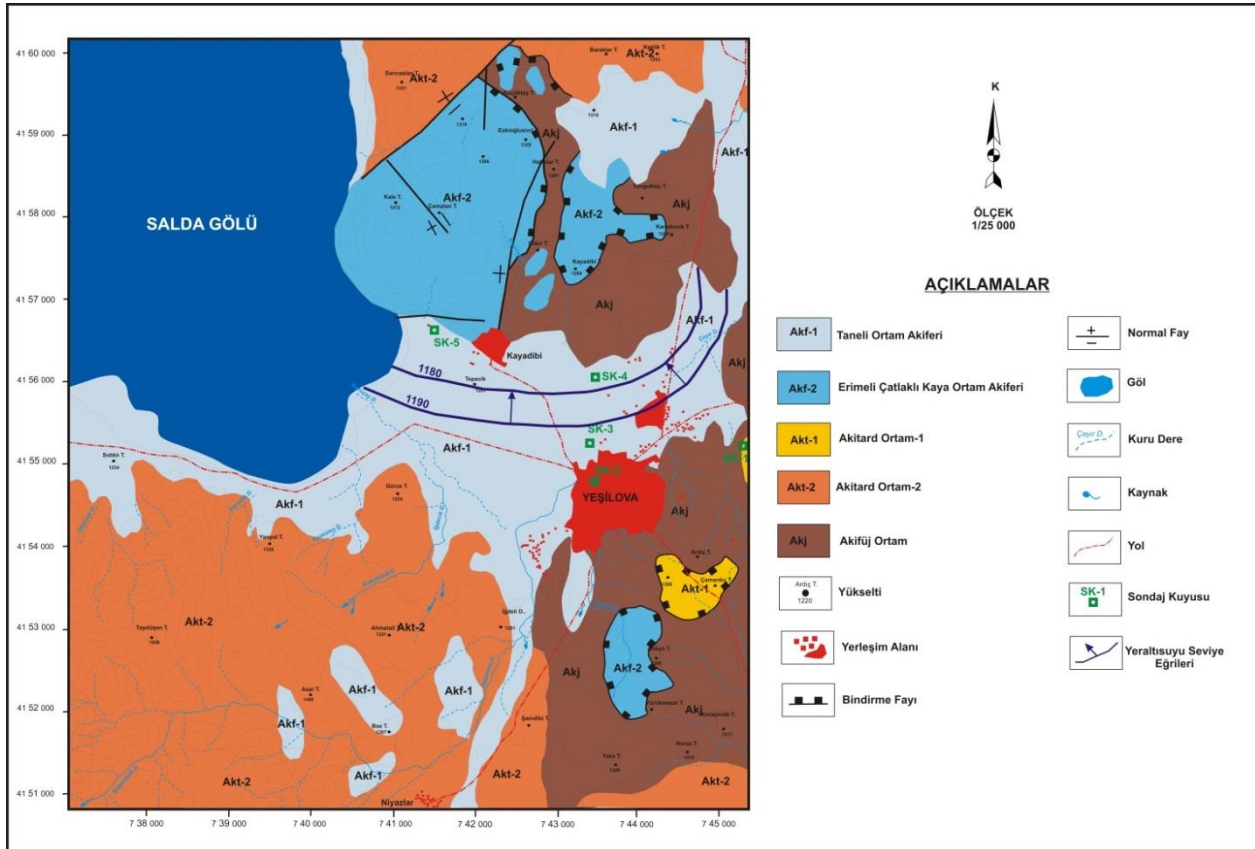
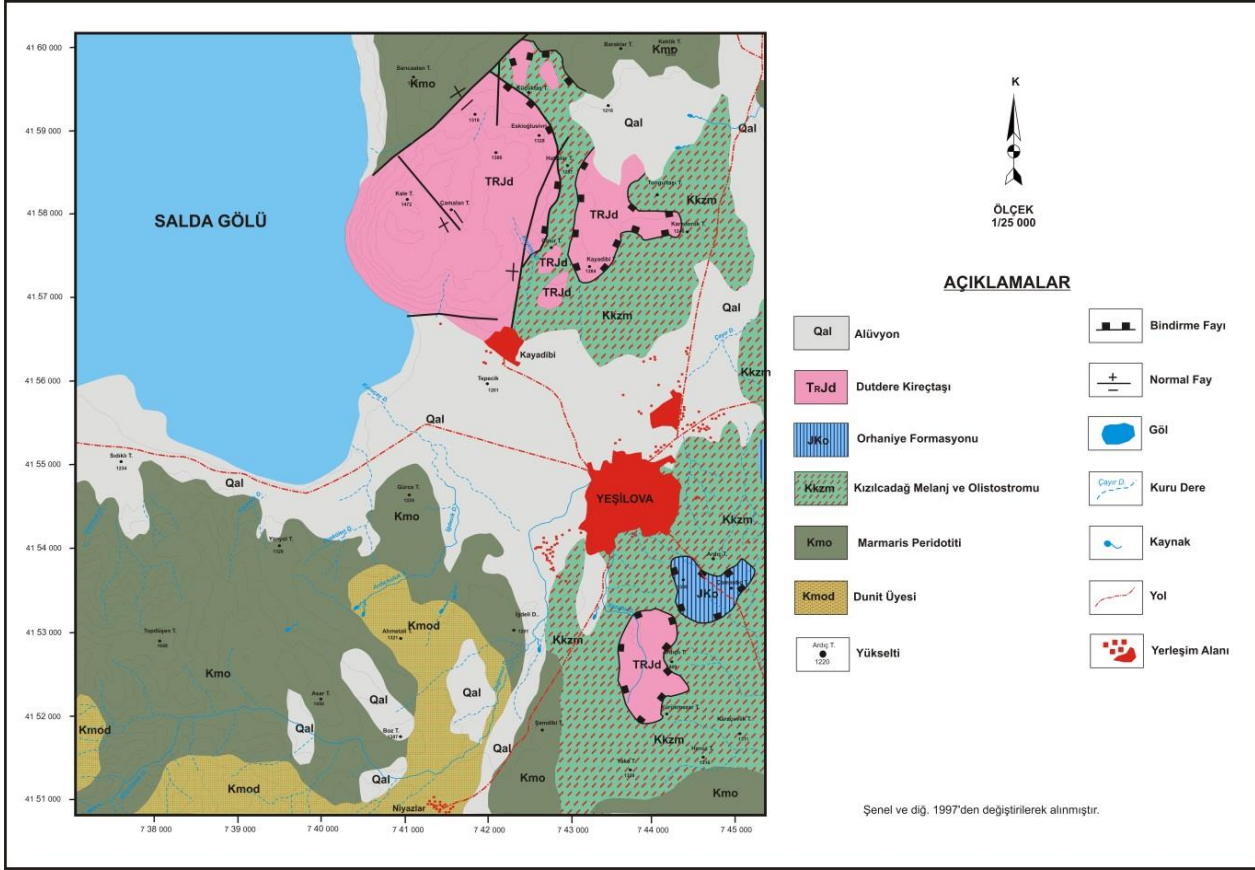
Çalışma alanındaki birimler hidrojeolojik özelliklerine göre değerlendirilerek sınıflandırılmıştır. Buna göre çalışma alanındaki birimler fiziksel özellikleri ve akifer olabilme özellikleri dikkate alındığında taneli ortam akiferi (Akf-1), erimeli-çatlaklı kaya ortam akiferi (Akf-2), akitard ortam-1 (Akt-1), akitard ortam-2 (Akt-2) ve akifüj ortam (AkJ) olarak ayrılmıştır. İnceleme alanında geniş alanlarda yüzeyleyen Kuvaterner yaşlı alüvyon Taneli ortam akiferini (Akf-1), Dutedere kireçtaşı birimi erimeli çatlaklı kaya ortam akiferini, Orhaniye formasyonu Akitard ortam-1, Marmaris peridotiti ve dunit birimleri hidrojeolojik açıdan Akitard ortam-2 ve Kızılcaadağ ofiyolitli melanj ve olistostromu ile İğdir metamorfite geçirimli özellikleri nedeni ile Akifüj ortamı temsil etmektedir (Varol vd., 2017) (Şekil 3.).

Alüvyon çalışma alanında Yeşilova köyünde geniş bir bölgede, Salda Gölü çevresinde ise ince bir şerit halinde yüzeylenmektedir. Alüvyon birim, kötü boylanmalı, zayıf pekleşmiş çakıl, kum ve çamurtaşı düzeylerinden oluşmaktadır. Birim bu özelliği ile gözenekli bir yapıya sahip olup iyi bir akifer özelliği taşımaktadır. Yeşilova civarında açılan kuyularda akifer kalınlığının en fazla 100 m'ye ulaştığı görülmektedir.

Kireçtaşları, çatlak ve erime boşluklarında önemli miktarlarda yeraltı suyu bulundurabilen ve suyun hareketine izin veren yapılardır. Çalışma alanında Kayadibi köyünün eteklerine yerleştiği Kale tepesi (1472 m) oluşturan ve Yeşilova güneyinde oldukça küçük bir alanda gözlemlenen Dutedere kireçtaşı birimi erimeli çatlaklı kaya ortamı temsil etmektedir.

İnceleme alanında Yeşilova ilçe merkezinin güney doğusunda oldukça küçük bir alanda gözlemlenen ve bazik volkanit, radyolarit, çört, şeyl ara düzeyli çörtlü mikrit ve dolomitik kireçtaşlarından oluşan Orhaniye formasyonu Akitard ortam-1 olarak ayrılmıştır. Birim içerisindeki kalsitürbidit seviyeleri ve dolomitik kireçtaşları az

miktarda su bulundurabilseler de volkanitler, radyolarit-çört-şeyl ara düzeyli çörtlü mikritler su bulundurma özelliğine sahip değildir.





Genel olarak geçirimsiz kabul edilen peridotit ve dunit birimleri yayılımları ve kırık çatlak sıklığına bağlı olarak önemli miktarda yeraltısuyu bulundurabilmektedirler. İnceleme alanı genelinde geniş alanlarda yayılıma sahip Marmaris peridotiti ve Dunit birimlerinin kırık ve çatlaklarından çok sayıda kaynak boşalımları gözlenmektedir. Bu kaynakların büyük bir çoğunluğu Salda Gölü kenarında olup gölü beslemektedir. Bu nedenle inceleme alanı için Marmaris peridotiti ve dunit birimleri hidrojeolojik açıdan Akıtar ortam-2 olarak değerlendirilmiştir.

Yeşilova ilçesi kuzey ve güneyinde bulunan Kızılcaadağ ofiyolitli melanj ve olistostromu ile İğdir metamorfileri birimleri geçirimsiz özellikleri nedeni ile Akifüj ortam olarak ayrılmıştır. Kızılcaadağ ofiyolitleri, serpantin ve serpantin hamur içerisindeki karbonatlar, radyolarit-çört, çörtlü kireçtaşı, neritik kireçtaşları ile bazalt, spilit, tuf, gabro, diyabaz vb. bloklardan oluşmaktadır. Ofiyolitik malzemeler içerisindeki kireçtaşlarında yeraltısuyu bulunabilirken genel yapı itibarıyla bu birimler yeraltısuyunu iletebilecek kapasitede değildir. Birim içerisindeki kaya türlerinin su bulundurabilme ve iletebilme özelliğine sahip olmamaları nedeni ile akifüj ortam olarak ayrılmıştır.

İnceleme alanında bulunan yeraltısuyu kuyuları genel olarak taneli ortam akiferi olarak tanımlanan alüvyon birim üzerinde açılmıştır. Bu birimde yeraltısuyu seviye değişimleri ve akım yönünün belirlenmesi amacıyla, temsili olarak seçilen 5 adet kuyuda kurak dönemi temsilen Mayıs-2015 ve yağışlı dönemi temsilen Ekim-2015 aylarında yeraltısuyu statik seviye ölçümleri yapılmıştır. İnceleme alanında geniş alanlarda yayılım gösteren alüvyon birim, kötü boylanmalı, zayıf pekleşmiş çakıl, kum ve çamurtaşı düzeylerinden oluşmaktadır. Birim bu özelliği ile gözenekli bir yapıya sahip olup iyi bir akifer özelliği taşımaktadır. Yeşilova civarında açılan kuyularda akifer kalınlığının en fazla 100 m'ye ulaştığı görülmektedir. Kuyularda alüvyon altında Kızılcaadağ melanjı ve Marmaris peridotiti birimleri kesilmiştir. Havzada Mayıs-Ekim 2015 dönemlerinde yapılan ölçümlere göre yeraltısuyu seviye değerlerinin 4-9.90 m arasında değiştiği tespit edilmiştir. Yeraltısuyu seviyelerinde kurak ve yağışlı dönem arasındaki seviye farkı ise 0.39-3.98 m arasındadır. Bu seviye değişimleri kurak dönemde yeraltısularının sulama suyu olarak kullanımından kaynaklanmaktadır. İnceleme alanında yeraltısuyu akım yönünün Salda Gölü'ne doğru olduğu tespit edilmiştir.

#### 4.4. Hidrojeokimya (Hydrogeochemistry)

Bölgedeki suların pH değerleri 7.3 ile 9.1 arasında değişmektedir. Bu nedenle çalışma alanındaki tüm sular "**bazik karakterli ve bazik sular**" sınıfında yer almaktadır. Suların EC değerleri 275.9 ile 1964  $\mu\text{S}/\text{cm}$  arasında, sıcaklık değerleri ise 13.6 ile 25.8  $^{\circ}\text{C}$  arasında değişmektedir. Sıcaklık değerlerine göre bölgedeki tüm sular "**çok az ılık ve ılık sular**" sınıfında yer almaktadır. Suların analiz sonuçlarından yararlanılarak suların sertlik değerlendirmeleri de yapılmıştır. Buna göre çalışma alanındaki suların sertlikleri 22.34– 55.30  $^{\circ}\text{Fr}$  arasında değişim göstermektedir. Buna göre çalışma alanındaki S1, S4, 13 ve S14 "**sert su**", S2, S3, S5, S6, S7, S9, S10, S11, S12 ve S15 no'lu örnekler "**çok sert su**" ve S7 ise "**çok fazla sert su**" sınıfında yer almaktadırlar. Suların sertlik derecelerindeki değişimin yağışlar ve suların kayalarla etkileşimine bağlı olduğu düşünülmektedir (Varol vd., 2017) (Tablo 2).

**Tablo 2.** Çalışma alanındaki suların fizikokimyasal ölçüm değerleri (Haziran-2015) (Results of physicochemical analysis of waters in the study area (June-2015))

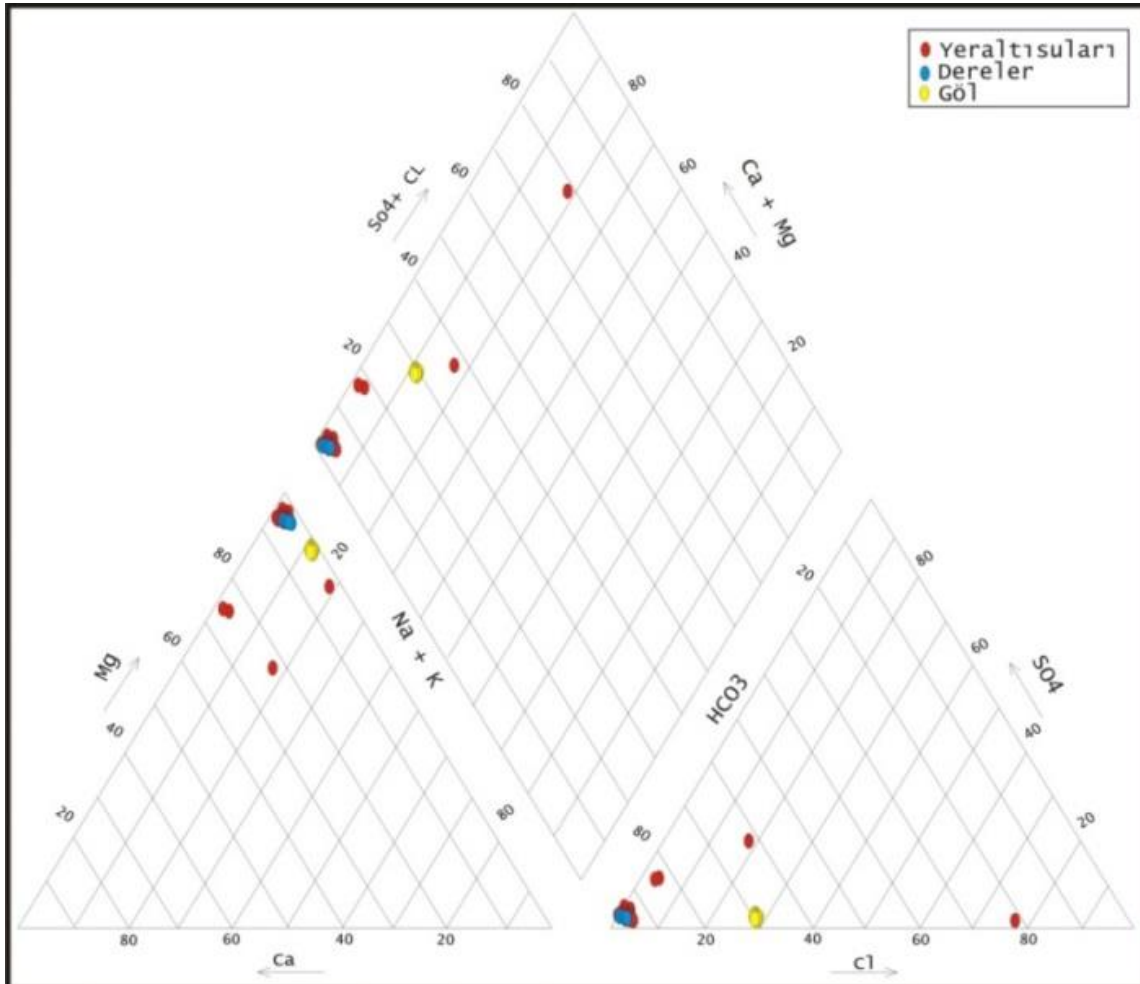
Örn. No	Örnek Tipi	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	EC $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	Sertlik	TDS	%Na	SAR
S1	Sond.	14.60	361.8	7.9	27.49	0.29	12.85	0.30
S2	Sond.	13.9	543	7.5	42.99	0.43	9.84	0.22
S3	Kayn.	15.6	459	8.4	42.36	0.36	2.86	0.06
S4	Kayn.	13.9	427	7.3	31.85	0.35	14.44	0.34
S5	Kayn.	16	538	7.5	40.43	0.41	9.40	0.21
S6	Dere	23.7	524	8.5	39.53	0.35	3.42	0.07
S7	Dere	23.5	517	8.5	39.26	0.35	3.12	0.06
S8	Dere	22.8	704	8.3	55.30	0.46	3.65	0.08
S9	Dere	25.8	554	8.6	40.33	0.36	3.25	0.07
S10	Kayn.	13.6	467.3	9.1	50.29	0.38	1.80	0.04
S11	Sond.	14.6	761	7.5	54.74	0.58	17.17	0.42
S12	Kayn.	17.9	506	8.2	44.91	0.38	2.10	0.04
S13	Kayn.	18.8	346.1	8.3	27.89	0.26	3.05	0.06
S14	Kayn.	21.4	275.9	9.0	22.34	0.2	2.30	0.05
S15	Göl	21	1964	9.0	35.41	109.9	1.18	21

Bölgedeki suların kimyasal yapısı ve su tipleri Tablo 3 de verilmiştir. Schoeller (1955) sınıflamasına göre; yeraltı, dere ve göl suları klorür sınıflamasına göre, '**Olağan klorürlü sular**', sülfat sınıflamasına göre, '**Olağan sülfatlı**

**sular'** ve karbonat-bikarbonat sınıflamasına göre '**Hiperkarbonatlı sular'** sınıflarına girmektedir. Piper (1944)'e göre yapılan sınıflandırmaya göre ise genel su örneklerinin tümü alkali toprak elementlerinin (Ca+Mg), alkali elementlere (Na+K) göre daha fazla olduğu, zayıf asit köklerinin (CO<sub>3</sub>+HCO<sub>3</sub>) güçlü asit köklerinden (SO<sub>4</sub>+Cl) fazla olduğu, karbonat sertliği % 50'den fazla olan suları temsil etmektedir. İnceleme alanında yeraltı ve dere sularının Mg-HCO<sub>3</sub>, Mg-Ca-HCO<sub>3</sub> ve Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>'lü sular sınıfında olduğu göl suyu ise Mg-Na-HCO<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub>'lü sular sınıfında olduğu görülmektedir (Şekil 4).

**Tablo 3.** Çalışma alanındaki su kaynaklarına ait majör iyon (mg/l) analiz sonuçları (Results of major ion (mg / l) analysis of water resources in the study area)

Örn No	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>
S1	27.73	50.00	11.55	0.62	18	268.40	6.79	12.47
S2	63.36	66.08	14.19	0.60	-	414.94	17.51	36.83
S3	17.16	92.57	3.23	0.17	48	353.80	2.69	3.72
S4	64.28	38.44	17.39	0.33	-	372.22	8.35	15.33
S5	29.90	80.15	11.44	0.22	-	512.57	6.04	12.24
S6	14.67	87.19	3.62	0.51	60	305	3.44	3.26
S7	14.35	86.73	3.27	0.44	60	311.10	3.82	3.05
S8	25.51	118.96	5.48	0.26	54	475.80	5.32	3.82
S9	15.05	88.91	3.51	0.45	66	305	3.91	3.22
S10	2.55	121.71	2.29	0.41	126	298.90	3.16	4.39
S11	58.28	97.73	32.57	1.15	-	402.73	49.84	66.93
S12	8.24	103.53	2.40	0.21	30	402.60	2.30	2.53
S13	9.28	62.16	2.25	0.09	42	231.80	2.06	2.52
S14	2.82	52.60	1.31	0.24	78	103.70	1.57	1.68
S15	3.63	326.39	195.21	25.98	576	744.2	177.43	16.07



**Şekil 4.** Piper (1944) diyagramı (Piper (1944) diagram)

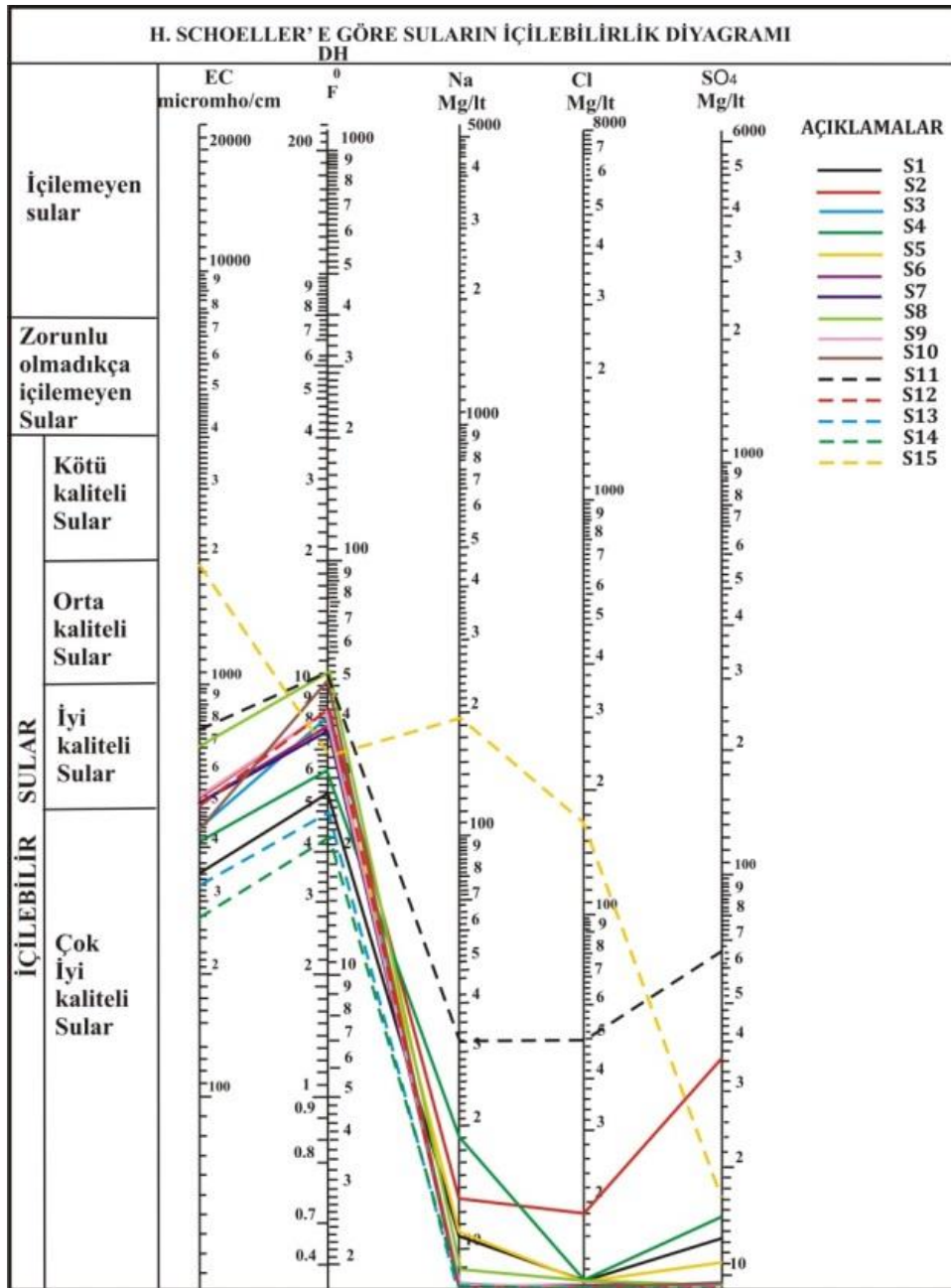


#### 4.5. Suların Kullanım Özellikleri (Usage Properties of Waters)

İnceleme alanındaki yeraltı ve yüzeysuları içme, kullanma ve sulama suyu gibi farklı amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır. Bu bölümde suların farklı amaçlar için kullanılabilme özellikleri Haziran-2015 döneminde yapılan analiz sonuçları, ilgili standartlar ve diyagramlar kullanılarak değerlendirilmiştir.

##### 4.5.1. Suların İçilebilirlik Özellikleri (Potable Water Properties)

İnceleme alanındaki suların içme suyu olarak değerlendirilmesinde öncelikle Türk İçme Suyu (TSE 266, 2005) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2011) standartları kullanılmıştır. Çalışma alanındaki su örneklerinin içme suyu olarak kullanılabilirliği TSE ve WHO standartlarına göre S2 no'lu örnek Al, S14 ve S15 no'lu örnekler As, S1-S3, S5-S15 no'lu örnekler Cr, S1 ve S5 no'lu örneklerin ise Fe bakımından içme suyu olarak kullanılamaz. Çalışma alanında sadece S11 no'lu örnekte NO<sub>3</sub> sınır değeri aşmakta bunun yanısıra diğer örnekler açısından da 10 mg/l'nin üzerinde görülen NO<sub>3</sub> seviyesi suyun antropojenik etkiye maruz kaldığını göstermektedir. Ayrıca, Schoeller içilebilirlik diyagramına göre yeraltısularının sertlik parametresi açısından '**orta kaliteli sular**' sınıfında, diğer parametreler açısından '**iyi-çok iyi sular kaliteli sular**' sınıfında yer aldığı görülmektedir. Göl suyu ise EC ve sertlik parametreleri açısından '**orta-kötü kaliteli sular**' sınıfında yer almaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Schoeller içilebilirlik diyagramı (Haziran-2015) (Schoeller potable diagram (June-2015))

İnceleme alanındaki yerleşim alanlarında yaşayan bölge halkı içme sularını kaynaklardan karşılamaktadır. Halk sağlığını yakından ilgilendiren içme suyu kaynaklarındaki mikrobiyolojik analiz sonuçlarına göre S3 nolu Niyazlar kaynak suyunun bakteriyolojik içeriğinin yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 4.). Bu durum, Niyazlar kaynağının açık havuzda toplandığı için kirletici unsurlara açık olmasından kaynaklanmaktadır.

**Tablo 4.** Kaynak, dere ve Salda Gölü sularının mikrobiyolojik analiz sonuçları (Haziran 2015) (Results of microbiological analysis of spring, stream and Salda Lake waters (June 2015))

Örnek No	Örnek Yeri	Örnek Türü	E. Koli	Koliform	F.Koliform
S3	Niyazlar	Kaynak	30	50	30
S4	Niyazlar	Kaynak	<2	<2	<2
S7	Salda	Dere	30	50	30
S8	Salda	Dere	30	50	30
S10	Yeşilova	Kaynak	<2	<2	<2
S12	Yeşilova	Kaynak	<2	<2	<2
S13	Yeşilova	Kaynak	<2	<2	<2
S14	Yeşilova	Kaynak	<2	<2	<2
S15	Salda Gölü	Göl	<2	<2	<2

#### 4.5.2. Suların Sulamada Kullanım Özellikleri (Irrigation Water Properties)

Su örneklerinin sulama suyu olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi için ABD Tuzluluk laboratuvarı ve Wilcox diyagramları ile Artıksal sodyum karbonat (RSC), Geçirgenlik indeksi (PI) ve Magnezyum Tehlikesi (MT) parametreleri kullanılmıştır (Tablo 5).

**Tablo 5.** İnceleme alanındaki suların RSC, PI ve MT değerleri (RSC, PI and MT values of the waters in the study area)

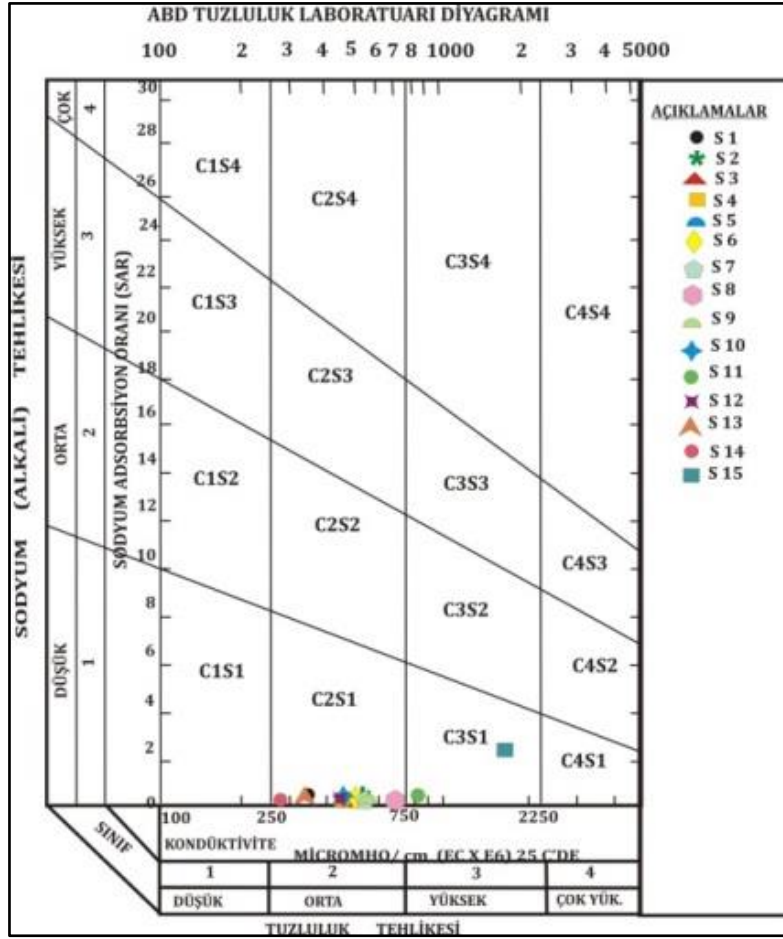
Örnek No	Türü	RSC	PI	MT
S1	S.kuyusu	-0,50	43,34	74,83
S2	S.kuyusu	-1,80	35,00	63,23
S3	Kaynak	-1,07	29,59	89,89
S4	Kaynak	-0,27	45,28	49,65
S5	Kaynak	0,32	39,57	81,55
S6	Dere	-0,91	29,69	90,74
S7	Dere	-0,75	30,03	90,88
S8	Dere	-1,46	26,83	88,49
S9	Dere	-0,87	29,07	90,69
S10	Kaynak	-1,04	22,59	98,75
S11	S.kuyusu	-4,35	32,24	73,44
S12	Kaynak	-1,33	29,60	95,39
S13	Kaynak	-0,38	36,08	91,70
S14	Kaynak	-0,17	30,07	96,85
S15	Göl	4,36	33,73	99,33

ABD Tuzluluk Lab. Diyagramı sınıflamalarına göre çalışma alanındaki sular genelde **C2S1 (Orta Tuzlulukta ve Az Sodyumlu)** sular sınıfında yer almaktadır. Bu sular içerisinde sadece S11 ve S15 örnekleri farklılık göstermektedir. S11 ve S15 örnekleri **C3S1 (Fazla Tuzlu ve Az Sodyumlu)** sular sınıfında yer almaktadır. Bu iki örneğin sulama suyu olarak kullanılabilirliği sınırlıdır (Varol vd., 2017) (Şekil 6).

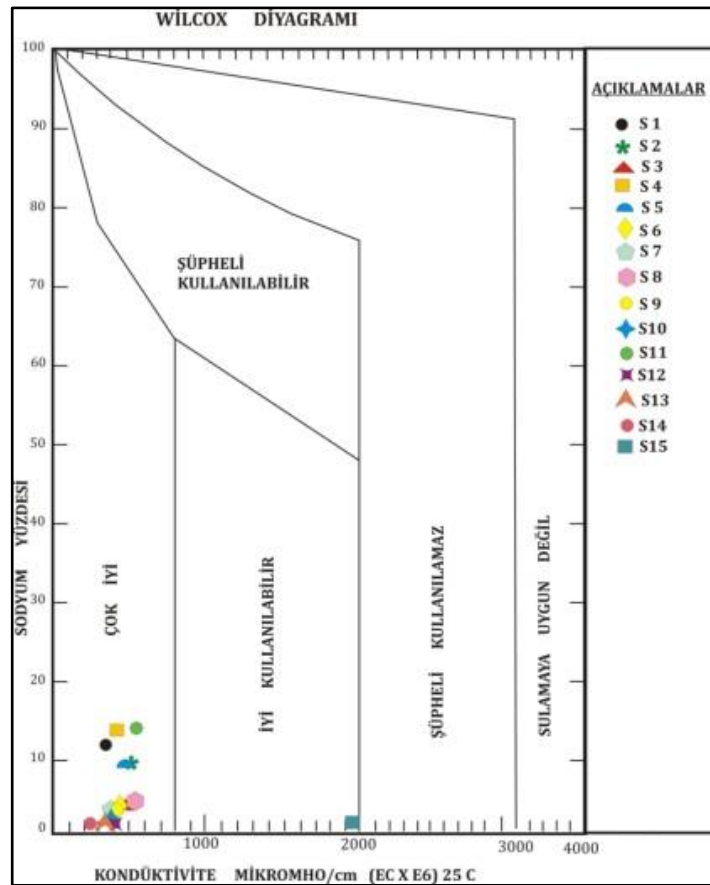
Suların sulama suyu olarak kullanılabilirliğini belirlemede kullanılan diğer bir diyagram ise Wilcox diyagramıdır. Wilcox diyagramına göre çalışma alanındaki sular '**Çok İyi-İyi Kullanılabilir Sular**' sınıfında yer almaktadır (Şekil 7).

Artıksal sodyum karbonat (RSC), toprakta sodyum oranının artma olasılığını önceden tahmin edilmesini sağlar. Yüksek RSC toprakta sodikleşmeye yol açacağından sulama suyunda bulunması istenmemektedir. Çalışma alanındaki sulardan, kaynak, sondaj ve dere suları RSC değerlerine göre "**çok iyi kalitedeki I. Sınıf su**" sınıfında, göl suyu örneği ise "**kullanılabilir kalitede III. sınıf su**" sınıfında yer almaktadırlar (Varol vd., 2017).

Geçirgenlik İndeksi (PI) değeri Dünya Sağlık Örgütü tarafından yapılan çalışmalarda sulama suyu için uygunluğun değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Çalışma alanındaki sular PI değerleri hesaplandığında tüm sular "**II. Sınıf Sular**" yani iyi sulama suyu özelliği taşımaktadır. %25 ile 75 arasındaki değerler PI değeri için II. sınıf suları temsil etmektedir (Varol vd., 2017).



Şekil 6. ABD Tuzluluk Laboratuari Diyagramı (Haziran-2015) (Salinity Laboratory Diagram (June-2015))



Şekil 7. Wilcox diyagramı (Haziran-2015) (Wilcox diagram (June-2015))

Sulama suyunda Mg artışı ise toprak kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir. Çalışma alanındaki sular MT açısından değerlendirildiğinde örneklerin tamamında Mg içeriğinin yüksek olması nedeniyle MT değerinin >50 olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak çalışma alanındaki suların tamamının sulama suyu olarak kullanıma **uygun olmadığı** belirlenmiştir (Varol vd., 2017) (Tablo 6).

#### 4.5.3. Suların Endüstride Kullanım Özellikleri (Industrial Usage Properties of Waters)

Suların içme ve sulama amaçlı kullanımları yanında endüstri alanında da kullanımları söz konusudur. Endüstride kullanılacak sularda aranan özellikler de kullanım yerine göre farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle inceleme alanındaki suların içme ve sulama suyu özellikleri yanı sıra endüstride kullanılması durumunda çürütme, kireçlendirme ve köpürme özellikleri ile beton üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

Suların çürütme ve kireçlendirme özelliklerini belirlemek amacıyla Langelier (1942) tarafından sunulan '*Kalsiyum Denge Diyagramı*' kullanılmıştır. Diyagram üzerinden okunan denge pH'sı (pHs) ile yerinde ölçümlerle belirlenen suyun pH değeri karşılaştırılarak DI denge endeksi hesaplanmıştır (Tablo 6).

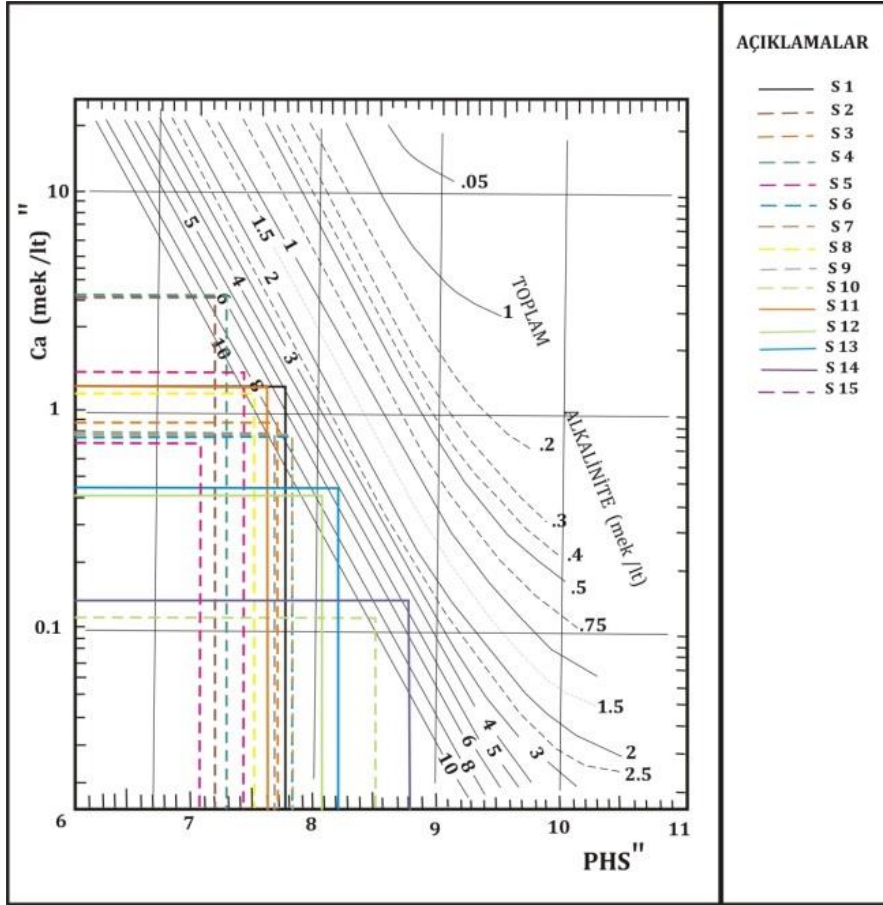
**Tablo 6.** Su örneklerinin pHs ve DI değerleri (Haziran 2015) (pHs and DI values of water samples (June 2015))

Örnek No	Türü	pH	pHs	DI
S1	S.kuyusu	7,90	7,8	0,10
S2	S.kuyusu	7,50	7,2	0,30
S3	Kaynak	8,40	7,9	0,50
S4	Kaynak	7,30	7,3	0,00
S5	Kaynak	7,50	7,4	0,10
S6	Dere	8,50	7,8	0,70
S7	Dere	8,50	7,8	0,70
S8	Dere	8,30	7,5	0,80
S9	Dere	8,60	7,6	1,00
S10	Kaynak	9,10	8,5	0,60
S11	S.kuyusu	7,50	7,6	-0,10
S12	Kaynak	8,20	8,1	0,10
S13	Kaynak	8,30	8,1	0,20
S14	Kaynak	9,00	8,8	0,20
S15	Göl	9,00	7,1	1,90

Buna göre çalışma alanındaki suların çoğunluğu '*karbonat çökmesi izlenir*' sular sınıfında yer almaktadır. Bunun yanısıra S1, S5 ve S12 örneklerinde "*su karbonatça doygun*" sınıfında ve S11 "*su karbonat çözüldürebilir*" sınıfında yer almaktadır (Varol vd., 2017) (Şekil 8).

Su içerisindeki potasyum ve sodyum tuzları suların kaynarken köpürmesine ve bu durum makinelerin kazan ve borularının cidarlarında çökme ve kabuklanmaya neden olmaktadır. Buna ek olarak çökme ve kabuklanma sonucunda ısı iletkenliği azalarak yakıt masrafını arttırmaktadır ve suda istenmeyen bir özelliktir. Çalışma alanındaki suların köpürme özelliği olan F değerleri hesaplanmış ve Tablo 7'de verilmiştir. S11 no'lu örneğin "*kaynarken köpüren sular (60 < F < 200)*" ve S15 no'lu örneğin "*kaynarken çok köpüren sular (F>200)*" sınıfında yer aldığı, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S12, S13 ve S14 nolu örneklerin ise "*kaynarken köpürmeyen sular (F<60)*" sınıfında yer aldığı belirlenmiştir (Varol vd., 2017).

Suların beton üzerinde etkisi içerisindeki sülfat miktarına bağlıdır. Sülfatlı suların çimento üzerindeki etkinliği oldukça büyüktür. Sülfatlı sular çimento içerisinde önemli miktarlarda CaO, MgO, SO<sub>4</sub> bulunması halinde bu maddelerin su ile birleşmesi durumunda önemli miktarda hacim artışına ve betonun parçalanmasına neden olabilmektedir (Şahinci, 1991). Çalışma alanındaki sularda sülfat miktarı 0.05-1.39 mek/l arasındadır. Suda bulunan sülfat miktarına ve bunun beton üzerinde yaratacağı etkiye göre yapılan sınıflandırmaya göre suların beton üzerinde "*etkime var*", "*Önemli*" ve "*Çok önemli*" olarak etkisi bulunmaktadır.



Şekil 8. Kalsiyum denge diyagramı (Haziran 2015) (Calcium balance diagram (June 2015))

Tablo 7. Suların hesaplanan F değerleri (Haziran 2015) (Calculated F values of waters (June 2015))

Örnek No	Türü	F
S1	S.kuyusu	32,39
S2	S.kuyusu	39,47
S3	Kaynak	9,05
S4	Kaynak	47,56
S5	Kaynak	31,29
S6	Dere	10,78
S7	Dere	9,70
S8	Dere	15,30
S9	Dere	10,37
S10	Kaynak	7,00
S11	S.kuyusu	90,13
S12	Kaynak	6,89
S13	Kaynak	6,25
S14	Kaynak	4,01
S15	Göl	578,38

#### 4.6. Yeraltısularında Kirlilik Araştırmaları (Pollution Researches in Groundwater)

Su kaynaklarında kirlenmeye neden olan en önemli kirlenici unsurları jeojenik ve antropojenik kökenli olarak iki kısımda incelemek mümkündür. Jeojenik kökenli kirlilik; suların içerisinden geçtikleri kayalarla etkileşimleri nedeniyle bünyelerine aldıkları elementlerden kaynaklanan kirliliktir. Bu durum su içerisinde bulunan elementlerin miktarı etkileşim süresi ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Yüzey ve yeraltı suyu kaynaklarının kirliliğini oluşturan en büyük etkenlerden bir diğeri ise antropojenik kökenli olarak ifade edilen, katı-sıvı atıklar, tarımsal faaliyetler ve çeşitli endüstri kuruluşlarından kaynaklanan kirliliktir. Su kaynaklarında en çok rastlanan kirlenici maddeler azot bileşikleridir olan nitrat, nitrit, amonyak, ağır metaller ve zehirli bileşiklerdir (Uslu ve Türkman, 1987).

Çalışma alanı olan Salda Gölü havzası içerisinde yer alan aynı zamanda Yeşilova ilçe merkezinin bulunduğu ve en büyük tarımsal faaliyetlerin gerçekleştirildiği bölgedir (HKEPH-BH, 2010). Çalışma alanında en önemli kirlilik



kaynakları, tarımsal aktivitelerden ve hayvancılık ile evsel katı ve sıvı atıklardır. Kirlilik düzeyinin belirlenmesinde kirlilik parametrelerinin kimyasal analizler yardımıyla tespit edilmesi gerekmektedir. Çalışma alanında, alüvyon akiferde yapılan tarımsal faaliyetler esnasında kullanılan pestisitler, doğal ve suni (yapay) gübreler ve ayrıca yöre halkının büyük bir çoğunluğunun geçimini sağladığı büyük ve küçükbaş hayvan yetiştiriciliği sırasında hayvansal atıkların neden olduğu kirlilik başlıca kirletici unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle çalışma alanındaki yeraltı ve yüzey sularındaki kirlilik durumunun tespiti için (Haziran 2015) azot ve türevleri ile iz element (Al, As, Cr, Fe) analizleri yapılmıştır (Tablo 8).

#### 4.6.1. Azot ve Türevleri (Nitrogen and Derivatives)

Yeraltısuyunda yoğun olarak tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan önemli kirleticilerden biri olan azot, çoğunlukla nitrat ( $\text{NO}_3$ ) şeklinde bulunur.  $\text{NO}_3$  yeraltısuyunda en sık rastlanan şekli olmasına karşın, çözülmüş azot, amonyum ( $\text{NH}_4$ ), nitrit ( $\text{NO}_2$ ), azot ( $\text{N}_2$ ), azot oksit ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ve organik azot şeklinde de bulunabilmektedir (Uslu ve Türkman, 1987). Günümüzde yeraltısularında nitrat ( $\text{NO}_3$ ) derişimi, tarımsal faaliyetler ve evsel atıkların etkisiyle giderek artmaktadır. Sularında 5-10 mg/l'nin üzerinde nitratın bulunması bu suyun antropojenik kökenli kirleticiler tarafından kirlendiğini göstermektedir. Türk içme suyu (TS 266, 2005) ve Dünya Sağlık Örgütü içme suyu (WHO, 2011) standartlarına göre içme sularında nitrat içeriğinin 50 mg/l'yi aşmaması istenmektedir. Nitrit ( $\text{NO}_2$ ) ve amonyum ( $\text{NH}_4$ )'ın ise içme sularında hiç bulunmaması gerekmektedir.

Çalışma alanından alınan su örneklerinin tamamında nitrit ve amonyum tespit edilememişken (<0.06 mg/l), nitrat 0.38-88.31 mg/l arasındaki değerler tespit edilmiştir (Varol vd., 2017) (Tablo 8.).

Elde edilen bu sonuçlar Türk içme suyu standartları (TSE 266) ve Dünya sağlık örgütü (WHO, 2011) standartları ile karşılaştırıldığında sadece S11 no'lu sondaj kuyusuna ait örnekte tarımsal faaliyetlerden nitrat konsantrasyonlarının sınır değeri aştığı belirlenmiştir. Ancak çalışma alanındaki suların her ne kadar nitrat içeriği bakımından da içilebilir özellikte olduğu görülse de örneklerin çoğunda nitrat değerleri 5-10 mg/l'nin üzerinde olduğu için suların antropojenik kökenli yani yapay gübre kullanımı ve hayvan atıklarının gübre olarak kullanımı nedeni ile kirlendiğini göstermektedir (Varol vd., 2017).

**Tablo 8.** Suların kirlilik parametrelerine göre analiz sonuçları (Haziran 2015) (Analysis results of water by pollution parameters (June 2015) )

Örnek No	Örnek Yeri	Örnek Türü	$\text{NO}_3$ (mg/l)	$\text{NO}_2$ (mg/l)	$\text{NH}_4$ (mg/l)	Al	As	Cr	Fe
S-1	Yeşilova	S.kuyusu	12.55	<0.01	<0.06	0.048	0.002	<b>0.254</b>	<b>0.640</b>
S-2	Yeşilova	S.kuyusu	36.67	<0.01	<0.06	<b>0.369</b>	0.003	<b>0.186</b>	0.187
S-3	Niyazlar	Kaynak	2.69	<0.01	<0.06	0.028	0.004	<b>0.181</b>	0.019
S-4	Niyazlar	Kaynak	17.80	<0.01	<0.06	0.003	0.005	0.005	<0.010
S-5	Niyazlar	Kaynak	7.78	<0.01	<0.06	0.022	0.007	<b>0.194</b>	<b>0.200</b>
S-6	İğdecik deresi	Dere	3.24	<0.01	<0.06	0.005	0.009	<b>0.154</b>	0.019
S-7	İğdecik deresi	Dere	3.51	<0.01	<0.06	0.014	0.008	<b>0.279</b>	<0.010
S-8	İğdecik deresi	Dere	0.83	<0.01	<0.06	0.003	0.006	<b>0.225</b>	<0.010
S-9	Kuruçay	Dere	2.18	<0.01	<0.06	0.005	0.008	<b>0.156</b>	<0.010
S-10	Yeşilova-Salda	Kaynak	2.41	<0.01	<0.06	0.004	0.007	<b>0.066</b>	0.012
S-11	Kayadibi	S.kuyusu	88.31	<0.01	<0.06	0.003	0.007	<b>0.143</b>	0.011
S-12	Yeşilova	Kaynak	4.25	<0.01	<0.06	0.002	0.008	<b>0.227</b>	0.015
S-13	Yeşilova	Kaynak	1.28	<0.01	<0.06	0.045	0.007	<b>0.131</b>	0.075
S-14	Yeşilova	Kaynak	1.62	<0.01	<0.06	0.004	<b>0.010</b>	<b>0.185</b>	0.023
S-15	Salda	Göl	0.44	<0.01	<0.06	<0.001	<b>0.021</b>	<b>0.372</b>	0.069
TS 266 2005			<b>50</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05-0.50</b>	<b>0.2</b>	<b>0.01</b>	<b>0.05</b>	<b>0.2</b>
WHO 2011			<b>50</b>	<b>3</b>	<b>0.05-0.50</b>	-	<b>0.01</b>	<b>0.05</b>	-

#### 4.6.2. İz Elementler (Trace Elements)

Doğal sularda major iyonlar dışında ikincil ve üçüncül olarak gelişen iyonlar da söz konusudur. İz elementler, su kaynaklarına, endüstriyel atıklar veya asit yağmurlarının toprağı ve dolayısı ile bileşimde bulunan bu iz elementleri çözmesi ve çözünen ağır metallerin ırmak, göl ve yeraltısularına ulaşmasıyla geçerler. İz elementlerin su içerisindeki varlığı suyun hangi tür kayaçlarla etkileşim içerisinde olduğunu bildirmesi yanı sıra su içerisindeki miktarı, suyun kalitesini de etkilemektedir. Bu nedenle, çalışma alanındaki sularda birincil (major) iyon analizleri ile birlikte iz element analizleri de yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında içme suyu standartlarını aşan konsantrasyonlara sahip iz elementlerden alüminyum (Al), arsenik (As), krom (Cr) ve demir (Fe) iyonlarının analizleri Türk İçme Suyu (TSE 266, 2005) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2011) standartları dikkate alınarak değerlendirilmiştir (Tablo 8).

Türk içme suyu standartlarında (TSE-266, 2005), sularda Al için sınır değeri en çok 0.2 mg/l olarak belirlenirken WHO (2011)'e göre Al için sınır değeri belirtilmemiştir. Çalışma alanındaki su kaynaklarında ise Al değeri 0-0.03



mg/l arasında değişmekte ve su örneklerinin hiçbirinde Al konsantrasyonları ulusal ve uluslararası standart değerleri sadece S2 no'lu sondaj kuyusu örneğinde aşmaktadır (Tablo 8). Bu örnekteki artışın antropojenik kökenli olduğu düşünülmektedir (Varol vd., 2017).

Yeraltısularında arsenik konsantrasyonu değişkenliği akifer arsenik içeriğine ve katı fazdan sıvı faza arseniğin serbest bırakıldığı değişik desorpsiyon/dispersiyon proseslerine, mineral çözünme/çökme, adsorpsiyon/desorpsiyon, yükseltgenme/indirgenme tepkime mekanizmaları ve biyolojik dönüşüme bağlıdır (Köse, 2017). Ayrıca, arsenik içeren tarımsal ilaçların kullanılması hem toprağa oradan da süzülme yoluyla yeraltına geçmesi açısından oldukça tehlikelidir. Madencilik, demir-dışı metallerin eritilmesi ve fosil yakıtların yanması gibi büyük endüstriyel prosesler arseniğin hava, su ve toprağa yayılarak çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Ayrıca, inorganik bileşikler içeren tarımsal ilaçların kullanılması ve kereste muhafazasında arsenik kullanılması sularda As kirliliğini artırmaktadır (WHO, 2006). Konsantrasyonu 0.01 mg/l'nin üzerinde olan arsenikli sular kuvvetli zehirleyici olup yüksek dozajlarda ani ölümlere sebep olmaktadır. Düşük konsantrasyonlardaki arsenik bile kronik zehirlenmelere, deride yüzeysel yaralara ve deri kanserine yol açmaktadır (Sargın, 2010). Çalışma alanındaki su örneklerinin As içeriği 0.002-0.021 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 8). S14 kaynak suyu örneği ile S15 göl suyu örneğinde içme suyu standartları tarafından belirlenen sınır değerin aştığı belirlenmiştir. Çalışma alanındaki As konsantrasyonlarındaki artışın jeojenik kökenli kirlilikten kaynaklandığı düşünülmektedir (Varol vd., 2017).

Krom elementi için sınır değeri TSE-266 (2005) ve WHO (2011)'de 0.05 mg/l, olarak belirlenmiştir. Çalışma alanındaki sularda krom konsantrasyonu 0.005-0.372 mg/l olarak belirlenmiştir. Sonuçlar içme suyu standartları ile karşılaştırıldığında S4 no'lu kaynak suyu örneği dışında diğer tüm örneklerin sınır değerleri aştığı belirlenmiştir (Tablo 8). Sulardaki krom artışına çalışma alanındaki Marmaris peridotiti ve Kızılcaadağ melanj ve ofiyolitleri içerisindeki kromitlere bağlı jeojenik kirliliğin neden olduğu düşünülmektedir (Varol vd., 2017).

Demir için TSE-266 (2005) içme suyu standardında belirlenen sınır değer 0.2 mg/l'dir. Çalışma alanındaki sularda demir konsantrasyonu <0.010-0.640 mg/l olarak belirlenmiştir. Analiz sonuçları içme suyu standartları ile karşılaştırıldığında S1 sondaj kuyusu ve S5 kaynak suyu örneklerinde içme suyu için belirlenen sınır değeri aştığı görülmüştür. Bu örneklerdeki demir artışına çalışma alanındaki jeojenik ve antropojenik kirliliğin neden olabileceği düşünülmektedir (Varol vd., 2017) (Tablo 8).

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

İnceleme alanını olarak seçilen bölge, yaklaşık 100 km<sup>2</sup> olup Burdur Gölü kapalı havzası ve aynı zamanda Salda Gölü beslenme havzası içerisinde yer almaktadır.

Çalışma alanı içerisinde yer alan litolojik birimler hidrojeolojik özelliklerine göre değerlendirilerek sınıflandırılmıştır. Buna göre çalışma alanında Taneli ortam akiferini (Akf-1) temsil eden ve geniş alanlarda yüzeyleyen Kuvaterner yaşlı alüvyon ile erimeli çatlaklı kaya ortam akiferini temsil eden Dutdere kireçtaşı birimi en önemli akiferlerdir. Çalışma alanı için ortalama yağış miktarı 316.39 mm olup 154 km<sup>2</sup>'lik çalışma alanına düşen ortalama yıllık yağış miktarı 48.72x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/yıl olarak hesaplanmıştır. Buharlaşma ile gerçekleşen boşalım miktarı ise 324.84 mm olup gerçek buharlaşma (Etr) ile 50.02x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/yıl olarak hesaplanmıştır.

Piper diyagramına göre inceleme alanında yeraltı ve dere sularının Mg-HCO<sub>3</sub>, Mg-Ca-HCO<sub>3</sub> ve Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>'lü sular sınıfında olduğu göl suyu ise Mg-Na-HCO<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub>'lü sular sınıfında olduğu görülmektedir. Çalışma alanındaki su tipleri kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve dolomit birimleri ile kayaç-su etkileşimine bağlı olarak gelişmektedir.

İnceleme alanındaki suların içme suyu olarak değerlendirildiğinde, S2 no'lu örnek Al, S14 ve S15 no'lu örnekler As, S1-S3, S5-S15 no'lu örnekler Cr, S1 ve S5 no'lu örneklerin Fe konsantrasyonları bakımından içme suyu olarak kullanılamayacağı görülmektedir. Azot ve türevleri bakımından ise çalışma alanında sadece S11 no'lu örnekte sınır değerin aşıldığı bunun yanı sıra diğer örnekler açısından da 10 mg/l'nin üzerinde görülen NO<sub>3</sub> seviyesi suyun antropojenik etkiye maruz kaldığını göstermektedir. Ayrıca suların mikrobiyolojik analiz sonuçlarına göre S3 nolu Niyazlar kaynak suyunun bakteriyolojik içeriği yüksek olduğu görülmektedir. Niyazlar kaynağının açık havuzda toplandığı ve kirletici unsurlara açık olduğu görülmektedir. Suların sulama suyu olarak kullanılabilirliği değerlendirildiğinde ABD Tuzluluk Lab. Diyagramı sınıflamalarına göre çalışma alanındaki sular genelde C2S1 (Orta Tuzlulukta ve Az Sodyumlu) sular sınıfında yer almaktadır. Bu sular içerisinde sadece S11 ve S15 örnekleri farklılık göstermektedir. S11 ve S15 örnekleri C3S1 (Fazla Tuzlu ve Az Sodyumlu) sular sınıfında yer almaktadır. Bu iki örneğin sulama suyu olarak kullanılabilirliği sınırlıdır. Wilcox diyagramına göre çalışma alanındaki tüm sular 'Çok İyi-İyi Kullanılabilir Sular' sınıfında yer aldığı görülmüştür. RSC değerlerine göre, kaynak, sondaj ve dere suları "çok iyi kalitedeki I. Sınıf su" sınıfında, göl suyu örneği ise "kullanılabilir kalitede III. sınıf su" sınıfında yer alırken, PI değerlendirmelerinde tüm sular "II. Sınıf Sular" yani iyi sulama suyu özelliği taşımaktadır. Ayrıca, MT açısından

değerlendirildiğinde örneklerin tamamı sulama suyu olarak kullanıma uygun olmadığı belirlenmiştir. Suların endüstride kullanım açısından çürütme ve kireçlendirme özelliklerini belirlemek amacıyla Langelier (1942) tarafından sunulan Kalsiyum Denge Diyagramına göre çalışma alanındaki suların çoğunluğu 'karbonat çökmesi izlenir' sular sınıfında yer almaktadır. Bunun yanı sıra S1, S5 ve S12 örneklerinde "su karbonatça doygun" sınıfında ve S11 ise "su karbonat çözündürebilir" sınıfında yer almaktadır. Ayrıca, çalışma alanındaki suların köpürme özelliği olan F değerleri hesaplanmıştır. Buna göre S11 "kaynarken köpüren sular" ve S15 no'lu örnek ise "kaynarken çok köpüren sular" sınıfında yer aldığı, diğer suların (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S12, S13 ve S14) ise "kaynarken köpüren sular" sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir. Suda bulunan sülfat miktarına ve bunun beton üzerinde yaratacağı etkiye göre yapılan sınıflandırmaya göre bölgedeki suların beton üzerinde "etkime var", "Önemli" ve "Çok önemli" olarak etkisi bulunmaktadır.

Çalışma alanındaki sularla yaptırılan iz element analizleri Türk İçme Suyu (TSE 266) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2011) standartları ile karşılaştırıldığında alüminyum (Al), arsenik (As), krom (Cr) ve demir (Fe) iyon konsantrasyonlarında artış belirlenmiştir. Bu ağır metallere As ve Cr artışının jeojenik kökenli olduğu düşünülürken, Al ve Fe iyonlarındaki artışın hem jeojenik hem de antropojenik kökenli olabileceği düşünülmektedir.

### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma TÜBİTAK-ÇAYDAG tarafından 114-Y-084 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

### Çıkar Çatışması / Conflict of Interest

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

### Kaynaklar (References)

- Akkaya, C., Efeoğlu, A., & Yeşil, N. 2006. Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi ve Türkiye'de Uygulanabilirliği. TMMOB Su Politikaları Kongresi, 21-23.
- Akkuş, A., 1987. Salda Gölü Jeomorfolojisi, İstanbul Üniversitesi, Coğrafya Dergisi, sayı:2, sayfa: 109-115.
- Akyürek, M., Alp, A., Akyürek, H., 1996. Salda Gölü'nün fizikokimyasal ve temel biyolojik özelliklerinin tespiti ile akuakültür imkanlarının araştırılması projesi, T.C Tarım ve Köyşleri Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar Genel Müdürlüğü Su Ürünleri Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü-Eğirdir, 20 sayfa
- Altınlı, E. 1955. The Geology of Southern Denizli. İstanbul Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Mec. Seri B, XX, No:1-2, sayfa:1-45, İstanbul.
- Ardel, A., 1951. Göller bölgesinde morfolojik müşahedeler İstanbul Üniversitesi Coğrafya Entitüsü Dergisi No:2 sayfa:1-19, İstanbul.
- BİÇDR, 2010. Burdur İl Çevre Durum Raporu, Burdur İl Çevre ve Orman Müdürlüğü, Burdur.
- Braithwaite, C.J.R., Zedef, V., 1996. Hydromagnesite stromatolites and sediments in an alkaline lake, Salda Gölü, Turkey. Journal of Sedimentary Research 66: 991-1002
- Erentöz, C., 1974. Türkiye Jeoloji Haritası (Denizli), 1/500000 ölçekli MTA Yayınları, Ankara
- HKEPH-BH, 2010. Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması-Burdur Havzası, TÜBİTAK-MAM Çevre Enstitüsü Raporu.
- Kazancı, N., Girgin, S., Dugel, M., Mutlu, B., Dere, S., Barlas, M., Özcelik, M., 2000. Lakes of Turkey, Kazancı N (ed.). Ekobil Tasarım ve Yayıncılık Ltd. Sti. (CD-ROM.)
- Kazancı, N., Girgin, S., Dugel, M., Oğuzkurt, D., Mutlu, B., Dere, S., Barlas, M., Özcelik, M., 1999. Researches on Inland Waters of Turkey IV: Limnology, Environmental Quality and Biological Diversity of Koycegiz, Beysehir, Egirdir, Aksehir, Eber, Çorak, Kovada, Yarıslı, Bafa, Salda, Karatas, Cavuscu Lakes, Buyuk and Kucuk Menderes Deltası, Gulluk vand Karamuk Marshy Areas. Imaj Press: Ankara
- Köse, İ., 2017. Yazır Gölü (Çavdır/Burdur) Sulak Alan Havzasının Hidrojeoloji ve Hidrojeokimyasal İncelemesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, 117 sayfa, Isparta
- Lise, Y., Gülle, İ., Kesici, E., Dişli, E., Akarsu, F., Küçükala, A., Çalışkan, B. K., Gül, S., 2013. Salda Gölü Sulak Alan Alt Havzası Biyolojik Çeşitlilik Araştırması, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü
- Piper, A. M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Trans. Amer. Geophys. Union. vol. 25. p. 914-923.
- Sargın, A. H., 2010. Yeraltı Suları, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltı Suları Dairesi Başkanlığı Ankara 208 s.
- Schoeller, H., 1955. Gechemie des eaux souterranes. Rev. Inst. Franc. Petrole. Paris. 10. No. 3-4
- Süner, F., Akyüz S., Kumral, M., Budakoğlu, M., Çelenli, A., 2000. Salda Gölü Güncel Manyezit Oluşumlarının Jeokimyasal, Endüstriyel ve Çevresel Nitelikleri, TÜBİTAK ÇAYDAG, Proje No:198Y055 Proje raporu
- Şahinci, A., 1991. Doğal Suların Jeokimyası. Reform Matbaası. Bölüm 2.. s.33. İzmir.
- Şenel, M., Akyürek, B., Can, N., Aksay, A., Pehlivan, N., Bulut, V., Aydal, N., 1997. Türkiye Jeoloji Haritaları, 1:100 000 ölçekli Denizli M23(J9) paftası, MTA yayınları, MTA Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Taymaz, T. And Price, S.P., 1992. Burdur Earthquake Sequence SW Turkey: a synthesis of seismological and geological observations, Journal of Geophy. Int., 589-603,

- TSE266, 2005. İnsani tüketim amaçlı sular, Türk İçme Suyu Standartları TS 266 sayılı standart -Türk Standartları Enstitüsü – Ankara.
- Uslu, O. ve Türkman, A., 1987, Su Kirliliği Ve Kontrolü. T.C. Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü Yayınları Eğitim Dizisi, 364 s., Ankara
- Varol S., Davraz A., Şener Ş., Aksever F., Şener E., Kırcan B. & Tokgözlü A. 2017. Salda Gölü Sulak Alanı Hidrojeolojisi, Hidrojeokimyasal Özelliklerinin İzlenmesi ve Kirlilik Durumunun Tespiti. TÜBİTAK ÇAYDAG proje raporu, Proje No: 114Y084
- WHO, 2006. Guidelines for drinking water quality: incorporating first addendum. Vol. 1, recommendations, (3rd ed.), chapter 9: radiological aspects. Geneva: World Health Organization.
- WHO, 2011. Guidelines for drinking-water quality. 4th edition, World Health Organization.
- Yalçınlar, İ. 1959. Batı Anadolu'da bir Kubbe Strüktürünün Mevcudiyeti Hakkında. Türk Coğrafya Dergisi, Yıl 14-15, sayı:18-99 sayfa:160-163, İstanbul.
- Yılmaz, A. Ve Kuşcu, M., 2012. Manyezit yataklarının oluşumu, sınıflandırılması, kullanım alanları ve kalite sınıflandırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28(1): 65-72  
<http://www.yesilova.gov.tr/ilcemiz-tarihcesi>



## YÜK VAGONU BOJİSİ TASARIMINDA ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİKLERİ İLE MALZEME SEÇİMİ

M. Hüseyin ÇETİN\*, Gülüstan Tuğçe ALVALI

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
Y25 Boji, ANSYS, TOPSIS, VIKOR.	Demiryolu araçlarının mekanik mühendisliği açısından en kritik parçası bojidir. Boji, masif yüklere maruz demiryolu araçlarının hareket, yük taşıma ve sönümleme işlemlerini yerine getirir. Kaynaklı çelik konstrüksiyondan imal edilen bojilerde yapı malzemesi olarak karbonlu çelik malzemeler tercih edilmektedir. Bu çalışmada, boji malzemesi için S235, S275 ve S355 malzemeler dikkate alınarak en uygun karbonlu çelik alaşımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Malzeme seçiminde; emniyet katsayısı maksimizasyonu, birim fiyat minimizasyonu ve kaynak edilebilirlik maksimizasyonu hedef fonksiyonlar olarak dikkate alınarak optimizasyon problemi modellenmiştir. Modelin çözümü için çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan TOPSIS ve VIKOR algoritmaları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar birinci derecede en uygun malzemenin S355 çeliği, ikinci derecede en uygun malzemenin ise S275 çeliği olduğunu göstermektedir. Ayrıca S355-S275 kombinasyonu ile gerçekleştirilecek konstrüksiyonun çok daha iyi sonuçlar vereceği belirlenmiştir.

## MATERIAL SELECTION USING MULTI CRITERIA DECISION MAKING METHODS IN THE DESIGN OF FREIGHT WAGON BOGIE

Keywords	Abstract
Y25 Bogie, ANSYS, TOPSIS, VIKOR.	In terms of mechanical engineering, the most critical part of rolling stocks is bogies. Bogies perform the processes of movement, freightage and damping of rolling stocks exposed to massive freight. Carbon steel materials are preferred as the construction material of bogies when they are produced by welded steel construction. In this study, it is aimed to determine the most suitable carbon steel alloy for the material of bogies taking into consideration S235, S275 and S355 materials. Optimization problem has been modelled in material selection by considering the target functions as maximisation of safety factor, minimisation of unit price and maximisation of weldability. Algorithms of TOPSIS and VIKOR, which are multi-criteria decision-making models, have been used for the solution of model. According to the results, it is seen that the most suitable material is primarily steel of S355 and secondarily steel of S275. Furthermore, it is determined that constructions with the combination of S355 and S275 will enable much better results.

### Alıntı / Cite

Çetin, M. H., Alvalı, G. T., (2020). Yük Vagonu Bojisi Tasarımında Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Malzeme Seçimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 91-104.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
M. H. Çetin, 0000-0003-0429-5507	Başvuru Tarihi / Submission Date	11.01.2019
G. T. Alvalı, 0000-0003-0315-506X	Revizyon Tarihi / Revision Date	17.05.2019
	Kabul Tarihi / Accepted Date	22.07.2019
	Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: hçetin@karabuk.edu.tr, +90-551-905-4354

## 1. Giriş (Introduction)

Demiryolu taşımacılığı diğer taşımacılık sistemlerine göre güvenli, düşük maliyetli ve çevrecidir. Ülkelerin gelişmişlik düzeyleri ile demiryolu kullanımı arasında pozitif yönde ve güçlü bir korelasyon bulunmaktadır. ABD 293.564 kilometre (km) demiryolu hat uzunluğu ile en uzun demiryolu hattına sahip iken, Çin 127.000 km ile ikinci sıradadır. Ülkemizde ise anahat uzunluğu 12.008 km olup, hat uzunluğu bakımından dünyada 20. sırada yer almaktadır. Yatırım politikaları neticesinde 2023 yılına kadar ulaşımaya ayrılan 300 milyar euroluk yatırımın, 50 milyar euroluk kısmının demiryolu hatlarına tahsis edilmesi planlanmaktadır (Pektaş, 2017).

Demiryolu araçlarını oluşturan ve vagon ile tekerlek arasında bağlantıyı sağlayan parçaya boji denir. Bojinin görevi, vagon hareketini sağlamak ve vagonun aktarılan yükleri taşımaktır. Taşıtın güvenliği ve konforu kullanılan bojiye bağlıdır. Boji üzerinde konforu ve güveni sağlamak üzere birçok yardımcı makine elemanı bulunur. Bojinin güvenliğini etkileyen birincil unsur taşıdığı yük miktarı, ikincil unsur ise yol kalitesi ve yol geometrisidir. Dünyada genel olarak yolcu vagonlarında Y32 bojisi, yük vagonlarında ise Y25 bojisi kullanılmaktadır. Yük vagon bojileri, daha fazla yük ve daha engebeli arazilerde gidebildikleri için yolcu vagon bojilerine göre daha kritik yapıdadırlar.

Bojilerin konstrüktif açıdan iyileştirilmeleri sadece geometriye ve yükleme koşullarına değil farklı malzeme kullanımına da bağlıdır. Boji üretiminde ağırlıklı olarak düşük ve orta karbonlu genel makine imalatı çelikleri kullanılmaktadır (S235, S275, S355). Seçilen malzemenin kimyasal özellikleri emniyet katsayısını, kaynak edilebilirliği, kaynak işçiliğini ve malzemenin işlenebilirliğini etkilemektedir. Ayrıca boji imalatında tek bir malzeme yerine farklı özelliklerde çelik alaşımlarının kombinasyonları da tercih edilebilmektedir. Farklı malzeme kombinasyonu ile imal edilen bojilerin üretimi, tek malzeme ile üretilen bojilere göre daha zor ve maliyetlidir. Bu durum boji tasarımı aşamasında ideal imalat malzemesinin seçilmesi aşamasını çok kriterli bir optimizasyon problemi haline getirmektedir. Optimizasyon yaklaşımında en uygun malzemenin belirlenmesi, maksimum güvenliğin, maksimum kaynak edilebilirliğin, maksimum işlenebilirliğinin sağlanması ile mümkün olurken, minimum işçilik saati ve minimum malzeme maliyeti de diğer belirleyici unsurlar olacaktır.

Bu çalışmada, Y25 bojisinin üretiminde en uygun malzemenin belirlenebilmesi için emniyet katsayısı, kaynak edilebilirlik ve birim fiyat parametreleri dikkate alınarak çok kriterli bir optimizasyon problemi analiz edilmiştir. Literatürdeki mevcut çalışmalarda bojinin mekanik emniyeti ile diğer üretim parametrelerinin birlikte değerlendirildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. 3 farklı çelik alaşımının (S235, S275, S355) araştırıldığı çalışmada, emniyet katsayısı hesabında statik analiz sonuçları, kaynak edilebilirlik için de malzemelerin kimyasal içeriğine bağlı olarak hesaplanan karbon eşdeğeri parametresi dikkate alınmıştır. Diğer bir kriter olan malzeme maliyeti için de ilgili malzemelerin birim satış fiyatları dikkate alınmıştır. Problemin çözümünde çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan TOPSIS ve VIKOR Metotları kullanılmıştır.

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Bojilerin bilgisayar destekli statik ve dinamik analizleri üzerine hem üreticiler hem de araştırmacılar tarafından çalışmalar yapılmaktadır. Üreticiler tarafından yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak sistem emniyetinin belirlenmesi, araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar ise konstrüktif iyileştirmeler üzerinedir. Özsoy tarafından yapılan çalışmada bojiye etki eden kuvvetler ve boji statik kuvvetleri belirlenmiştir. Analizi yapılan bojinin gerilme değerlerinin, kullanılan malzemenin akma değeri sınırları altında kaldığı görülmüştür (Özsoy,2008). Kima ve Yonaa kompozit bir boji şasisinin yapısal güvenliğini, statik test ve sonlu eleman analizi kullanılarak değerlendirmişlerdir. Goodman diyagramı kullanılarak yapılan yapısal güvenlik analizine göre, kompozit boji çerçevesinin sürekli mukavemet açısından güvenli bölge içinde olduğu görülmüştür (Kima ve Yonaa, 2011). Bayraktar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Y32 yolcu vagonu bojisinin statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. 114.001 N dik yönde ve 96.471 N yatay yönde kuvvet uygulanarak bojinin statik analizi gerçekleştirilmiştir. Statik analiz sonucu bojide 105 MPa lık gerilme meydana gelmiştir. Dinamik analizde ise 22 doğal frekans belirlenmiştir. Dinamik analiz sonucu meydana gelen 51,7930 Hz'lik frekans ile daha önce Yaho-hui tarafından yapılan çalışma sonucu bulunan bulguların benzer olduğu görülmüştür (Yaho-hui, 2009). Statik ve dinamik analizler neticesinde Y32 bojisinin güvenli olduğu gözlemlenmiştir (Bayraktar vd., 2013). Uygun tarafından yapılan çalışmada ise elektrikli bir bojinin şasisine gelen yükler dört farklı durum için hesaplanmış ve Ansys programında statik analiz yapılmıştır. Çıkan sonuçlarda bojide meydana gelen gerilmenin, kullanılan malzemenin akma değeri altında olduğu görülmüştür (Uygun, 2017).

Literatürdeki çalışmalarda, farklı bojilerin statik ve dinamik analizleri yapılmış ve bojilerin maruz kaldığı yükler altındaki gerilme durumları incelenmiştir. Gerilmenin büyüklüğü şasisinin emniyetini belirlemek için kullanılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar neticesinde bojilerin emniyet katsayıları belirlenmiş ve güvenlik kriterleri incelenmiştir. Genel olarak bojilerin güvenli olduğu ortaya çıkmış ve iyileştirilmesi gereken ekipmanlar belirlenmiştir. Mevcut

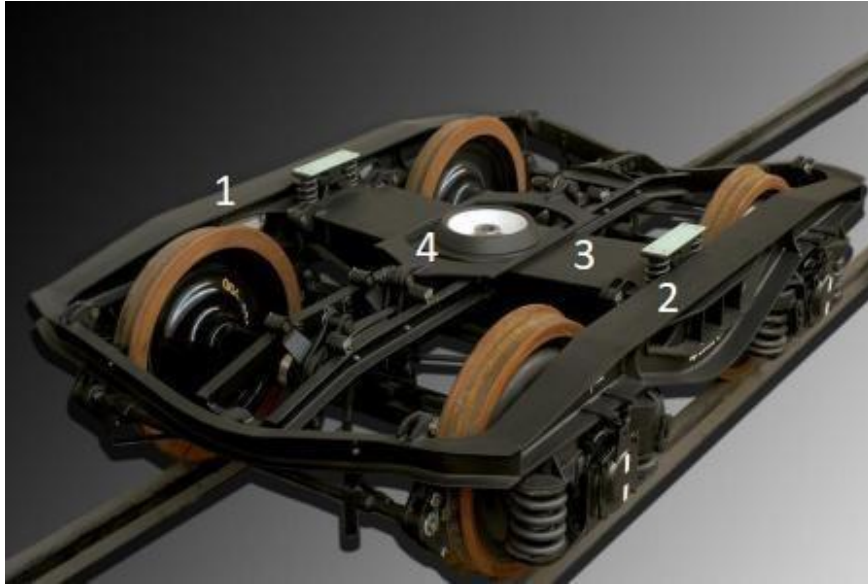
çalışmada literatürden farklı olarak üç farklı çelik alaşımının boji malzemesi olarak kullanılabilirliği, imalat ve maliyet faktörleri de dikkate alınarak analiz edilmiştir. Malzeme seçiminde sadece emniyet katsayısını dikkate almanın yeterli olmayacağı düşünülmüş, sürdürülebilir üretim için imal edilebilirlik ve optimum maliyet unsurlarının da analiz edilebilmesi için çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak problem modellenmiştir. Çalışma, mekanik bilimlerine ilişkin emniyet katsayısı parametresi, malzeme bilimlerine ilişkin karbon eşdeğeri parametresi ve ekonomik imalat için birim malzeme maliyeti verisini birlikte analiz edebilmesi itibarıyla literatüre önemli oranda katkı sağlayabilecektir. Ayrıca çalışma, araç teknolojileri için malzeme seçimi probleminde referans olabilecek niteliktedir.

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

Boji konstrüksiyonunda ana unsurlar dayanım, işlenebilirlik, kaynak edilebilirliktir. Dayanım aşaması ise kendi içinde; emniyet koşullarını sağlayan malzemelerin seçimi, temin edilebilirlik ve maliyet unsurlarını barındırmaktadır. Bu unsurlardan emniyet koşulu, malzeme maliyeti ve kaynak edilebilirlik parametreleri çalışma kapsamında dikkate alınmıştır. Emniyet koşulu analizi adımları; konstrüksiyonun modellenmesi, kuvvetlerin belirlenmesi, analiz şartlarının belirlenmesi ve analizin gerçekleştirilmesi şeklindedir. Kaynak edilebilirliğin analizi aşamasında, elemental analiz değerlerine göre hesaplanan karbon eşdeğeri parametresine göre derecelendirilme yapılmıştır. Malzeme maliyeti için de firmalardan alınan satış fiyatlarının ortalama değerleri dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır.

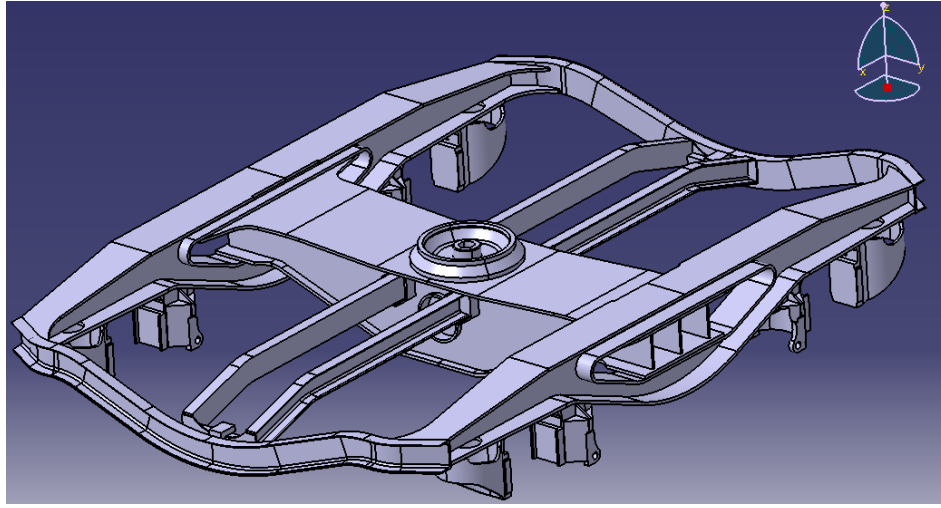
#### 3.1. Boji Dayanımı İçin Statik Kuvvetlerin Belirlenmesi ve Sonlu Elemanlar Analizi (Determination of Static Forces and Finite Element Analysis for Bogie Strength)

Ağır yük vagonu olarak kullanılan Y25 bojisi Avrupa Demiryolu Standartlarına (UIC) uygun olarak üretilmektedir (Şekil 1). Basit kullanımı ve kullanım esnasındaki uyumu sayesinde demiryolu yük taşımacılığı yapan firmalar tarafından yüksek oranda tercih edilmektedir. Y25 yük vagon bojisi, 22,5 ton dingil basınçlı ve 120 km/h hızlara kadar tüm yük vagonu tiplerine uyumlu olarak üretilmektedir. Bojinin ağırlığı ise yaklaşık olarak 5 tondur (URL1). Yük vagon bojisi, kurplarda daha rahat hareket edebilmesi için üç ana parçadan konstrükte edilmiştir. Y25 bojisi temel olarak iki ana taşıyıcı kiriş (1,2) ve pivotun (4) yatağı olan bolsterden (3) oluşmaktadır. Boji, vagon gövdesine pivottan (4) bağlanmaktadır (Vladimir, 2014.).



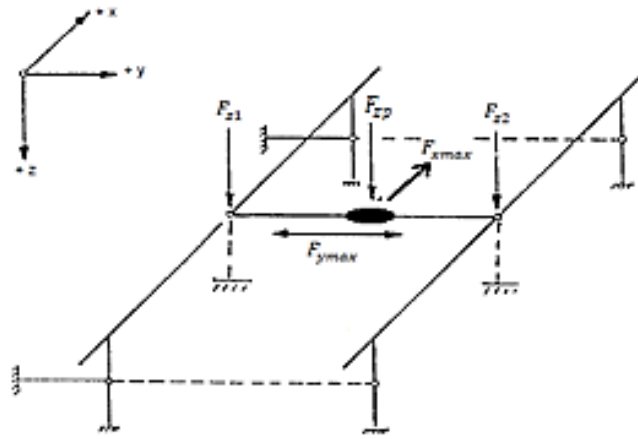
Şekil 1. Y25 Boji modeli (URL2) (Model of Y25 bogie)

Y25 bojisi, statik analiz için ilk olarak bilgisayar ortamında 3 boyutlu olarak modellenmiştir (Şekil 2). Statik analiz yapılabilmesi için uygulanacak kuvvetler TS EN 13749 "Demiryolu Uygulamaları- Tekerlek Takımları ve Bojiler-Boji Şasilerinin Yapısal Şartlarını Belirleme Metotları" standardında belirtilmiştir (TS EN 13749). Standartta yük vagon bojileri "Examples Of Loads For Freight Bogies With A Central Pivot And Two Side Bearers - Category B-V" kategorisinde yer almaktadır.



Şekil 2. Tasarlanan Y25 boji şasisi (Designed Y25 bogie chassis)

Statik analiz için uygulanacak kuvvetler Şekil 3’deki gibi etki etmektedir.



Şekil 3. Boji şasisine etki eden kuvvetler (TS EN 13749) (Forces acting on the bogie frame)

Şekil 3’te,  $F_z$  bojiye dik gelen kuvveti,  $F_{zp}$  pivot için uygulanan dikey yükü,  $m^+$  boji toplam ağırlığını ve  $M$  ise toplam vagon yükünü temsil etmektedir. Statik analiz yapılırken en büyük vagon olan Gabs vagonu seçilmiştir. Vagonun darası 28,5 ton ve maksimum yükleme kapasitesi 61,5 tondur (URL3).

Bojiye dik olarak etki eden kuvvet Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır.

$$F_z = ((M/2) - m^+) \cdot g \quad (1)$$

Dik kuvvet yalnızca pivota uygulandığında oluşacak kuvvet Eşitlik 2’de belirtilmiştir. Eşitlik 2’de yük çarpanı 2 olarak hesaba katılmıştır.

$$F_{zp} = 2 \cdot F_z \quad (2)$$

Dik kuvvetler hem taşıyıcıya hem de pivota uygulandığında oluşacak kuvvet ise Eşitlik 3 (yük çarpanı 1,5) ile hesaplanmaktadır.  $\alpha$  ifadesi salınım katsayısı olup genel olarak 0,1 olarak alınır.

$$F_{z1} = F_{z2} = 1,5 \cdot F_z \cdot \alpha \quad (3)$$

$$F_{zp} = 1,5 \cdot F_z \cdot (1 - \alpha) \quad (4)$$

Bojiye yatay yönde etki eden kuvvet hesabı ise Eşitlik 5’teki gibidir.  $F_{ytrmin}$ , yüksüz parçanın çarpaz kuvvet direnci olarak tanımlanır ve  $10^4$  olarak hesaba katılır.

$$F_{y1} = F_{y2} = \frac{F_{ymax}}{2} = F_{ytrmin} + \frac{F_z + (m^+ \cdot g)}{6} \quad (5)$$



Son olarak ise, her bir tekerleğe ve şasi kısmına karşılıklı, ters kuvvetler olarak uygulanan kuvvet hesabı yapılır.

$$F_{xmax} = 0,1 \cdot (F_z + m^+ \cdot g) \quad (6)$$

Eşitlik 2-5'te verilen katsayılar, bojiye etkiyen kuvvetlerin belirlenmesi amacıyla kullanılan TS EN 13749 standardına göre belirlenmiştir. Boji konstrüksiyonu kompleks bir geometriye sahip olup çok sayıda kaynaklı ve cıvatalı bağlantı noktası bulunmaktadır. Bu sebeple boji üzerindeki kuvvet akışının doğru bir şekilde belirlenmesi güçtür. Bu durum dikkate alınarak kuvvetlerin belirlenmesi aşamasında nominal değerler dikkate alınmış ve standartlarda tanımlanmıştır. Literatürde de benzer değerlerin kullanıldığı belirlenmiştir (Özsoy,2008, Bayraktar vd., 2013, Uygun, 2017).

TS EN 13749 ve UIC 515-4 standartlarına göre statik durumda bojiye etki eden kuvvetler hesaplanmıştır (Tablo 1). Standartlarda, yük vagon bojilerinin yedi farklı yükleme durumu için statik analiz kuvvetleri belirtilmiştir. Bu çalışmada, dikkate alınan yük koşulları için (5 ton boji ve 61,5 ton yük) emniyetli tasarım şartını sağlayan *sağ tarafa eğimli karp durumu* göz önünde bulundurulmuştur (Tablo 2).

**Tablo 1.** Bojiye etki eden kuvvetler (Forces acting on bogie)

Kuvvetler	Hesaplanan Değerler (kN)	Uygulanan Eşitlikler
$F_z$	392,40	(1)
1.Durum $F_{zp}$	784,80	(2)
2.Durum $F_{zp}$	529,74	(3)
$F_{z1}$	58,860	(4)
$F_{z2}$	58,860	(4)
$F_{y1}$	83,575	(5)
$F_{y2}$	83,575	(5)
$F_x$	44,145	(6)

**Tablo 2.** Bojiye etki eden statik kuvvetler (TS EN 13749) (Static forces affecting the bogie)

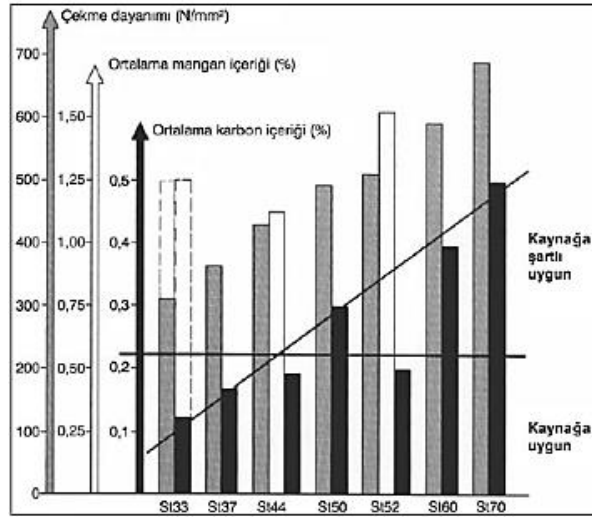
Yan Yüzeye Etki Eden Kuvvet 1	Pivota Gelen Kuvvet ( $F_{zp}$ )	Yan Yüzeye Etki Eden Kuvvet 2	Enine Kuvvet ( $F_y$ )
$\alpha(1-\beta) F_z$	$(1-\alpha)(1-\beta) F_z$	0	$-F_y$

Belirlenen kuvvetlere göre gerçekleştirilen statik analizler sonucunda bojinin emniyet katsayıları belirlenmiştir. Statik analiz için Ansys-Workbench ticari sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Gerilme değerleri maksimum eşdeğer gerilme (von-Misses) hipotezine göre belirlenmiştir. Analizin güvenilirliğini arttırabilmek için yoğun ağ örgüsü tercih edilmiştir (47344 eleman için 100788 ağ örgü noktası). Seçilen üç malzeme ve tek yükleme durumu için ayrı ayrı analizler gerçekleştirilmiştir. Maksimum ve minimum olmak üzere her malzeme için iki farklı emniyet katsayısı belirlenmiştir. Minimum emniyet katsayısı bojinin kritik olduğu bölgeleri temsil etmektedir.

### 3.2. Boji İçin Seçilen Malzemelerin Kaynak Edilebilirliği ve Maliyet Faktörü (Weldability of Materials Selected for Bogie and Cost Factor)

Üretimde rol sahibi olan ikinci unsurumuz ise seçilen malzemelerin kaynaklanabilirliğidir. Yapı çeliklerinin kaynaklanma kabiliyetleri pareto grafiği ile gösterilmiştir (Şekil 4) (Piroğlu vd., 2012). Çeliklerde karbon miktarı % 0,2 nin üzerinde olduğu zaman ön tavlama işlemi gerektirmektedir. Bu sebepten dolayı karbon miktarı %0,2'nin üzerinde olan çeliklerin kaynak kabiliyetleri düşüktür. Çeliklerde elemental olarak nikel, molibden, vanadyum vb. elementlerde bulunmakta ve çeliğin kaynak kabiliyetini etkilemektedir. Karbon ve diğer elementlerin, çeliklerin kaynak kabiliyeti üzerindeki etkileşimlerinin analizi için karbon eşdeğeri adında ampirik bir bağıntı geliştirilmiştir (Eşitlik 7). Seçilen üç farklı malzemenin elemental analizleri Tablo 3'te verilmiştir. Ayrıca element miktarlarına göre Eşitlik 7 dikkate alınarak hesaplanan karbon eşdeğeri miktarları da Tablo 3'te verilmiştir (URL4). Karbon eşdeğerliğinin yüksek olması kaynak kabiliyetini düşürmektedir. Bu sebeple karbon eşdeğeri parametresinde minimizasyon hedefi dikkate alınmıştır.

$$\%C_{es} = \%C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (7)$$



Şekil 4. Yapı çeliklerinin kaynağa uygunluğu (Piroğlu vd., 2012) (The convenience of structural steels for welding)

Tablo 3. Malzemelerin kimyasal özellikleri ve karbon eşdeğer miktarları (URL4) (Chemical properties and carbon equivalents of materials)

	%C	% Si	% Mn	% P	% S	% N	% Cu	C <sub>eş</sub>
S235	0,17	-	1,40	0,035	0,045	0,012	0,60	<b>0,48</b>
S275	0,21	-	1,50	0,035	0,035	0,012	0,55	<b>0,50</b>
S355	0,24	0,55	1,60	0,025	0,017	0,012	0,55	<b>0,54</b>

Son unsur olan malzeme birim fiyatları ise firmalardan temin edilmiş olup Tablo 4’te Türk Lirası cinsinden gösterilmiştir.

Tablo 4. Birim fiyatlar (Unit prices)

Çelik	Malzeme Birim Fiyatı (₺)
<b>S235</b>	2650
<b>S275</b>	2740
<b>S355</b>	2750

3 farklı çelik alaşımı (S235, S275, S355) için belirlenen kriterler çok kriterli bir problem oluşturmuştur. Problemin çözümünde çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan TOPSIS ve VIKOR Metotları kullanılmıştır.

#### 4. TOPSIS Metodu (TOPSIS Method)

TOPSIS yöntemi, Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biridir. Prensip, optimum ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözümden en uzak olan noktanın belirlenmesidir (Ünal ve Maleki, 2018). TOPSIS yöntemi, kompleks karar problemlerinde önemli bir değerlendirme yöntemi haline gelmiştir. Kullanımı hem akademik hem de işletme alanlarında çok geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. TOPSIS yöntemi beş adımdan oluşmaktadır. TOPSIS yöntemi aşağıda belirtilen adımlarla matematiksel olarak özetlenmiştir (Khorshidi ve Hassani, 2013).

1. Matris Eşitlik 8’e göre normalleştirilmiştir.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad j = 1,2,3, \dots, n; i = 1,2,3, \dots, m \quad (8)$$

2. Normalleştirilmiş karar matris elemanları, eşitliklerle elde edilen ilgili ağırlıklar ile çarpılır ve ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisi Eşitlik 9 tarafından oluşturulur;

$$V_{ij} = n_{ij}w_j \quad j = 1,2, \dots, n; i = 1,2,3, \dots, m \quad (9)$$

3. İdeal çözümler Eşitlik 10 ve Eşitlik 11 ile hesaplanır.

$$\{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\} \{(MaxV_{ij} | j \in K), ((MinV_{ij} | j \in K') | i = 1, 2, \dots, m)\} \quad (10)$$

$$\{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} \{(MaxV_{ij} | j \in K), ((MinV_{ij} | j \in K') | i = 1, 2, \dots, m)\} \quad (11)$$

K, fayda ölçütlerinin indeks kümesidir ve K' negatif kriterler içindir.

4. Optimum ideal (Eşitlik 12) ve negatif ideal (Eşitlik 13) değerler aşağıda verilmiştir.

$$Si^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2 \right\}^{0.5} \quad j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (12)$$

$$Si^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2 \right\}^{0.5} \quad j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (13)$$

5. İdeal çözüm için yakınlık, Eşitlik 14 ile değerlendirilir;

$$C_i = \frac{Si^-}{Si^+ + Si^-} \quad j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, 3, \dots, m; 0 \ll C_i \ll 1 \quad (14)$$

En yüksek  $C_i$  değeri, TOPSIS Yöntemi için en ideal parametredir.

## 5. VIKOR Metodu (VIKOR Method)

VIKOR metodu, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden bir diğeridir. VIKOR yöntemi çoğunluk için maksimum fayda ve minimum zarar sağlayan, ideale yakın uzlaşmacı bir çözüm belirler. Son yıllarda VIKOR yöntemi çok kriterli ve alternatifli problemlerin çözümünde yoğun kullanım alanı olan bir destek aracı haline gelmiştir (URL5). VIKOR yöntemi aşağıdaki gibi matematiksel olarak özetlenmiştir (Khorshidi ve Hassani, 2013, URL5);

1. En yüksek  $(x_{ij})_{maks}$  ve en düşük  $(x_{ij})_{min}$  parametrelerinin öncelikle karar matrisinden belirlenen tüm kriterler arasında belirlenmesi gerekir.
2.  $E_i$  ve  $F_i$  parametreleri Eşitlik 15-16'ya göre hesaplanır.

$$E_i = \sum_{j=1}^n w_j \left[ \frac{[w_i[(x_{ij})_{max} - (x_{ij})]}{[(x_{ij})_{max} - (x_{ij})_{min}]} \right] \quad (15)$$

$$F_i = \max \left[ \frac{[w_i[(x_{ij})_{max} - (x_{ij})]}{[(x_{ij})_{max} - (x_{ij})_{min}]} \right] \quad (16)$$

3.  $Q_i$  değeri Eşitlik 17'ye göre hesaplanır.

$$Q_i = (v(E_i - E_{i_{min}})/(E_{i_{max}} - E_{i_{min}})) + (1 - v)((F_i - F_{i_{min}})/(F_{i_{max}} - F_{i_{min}})) \quad (17)$$

$v$  değişkeni grup faydası olarak adlandırılır ve yaklaşık olarak 0,5 olarak alınır.  $E_i$ ,  $F_i$  ve  $Q_i$  değerleri istatistiki ağırlık katsayısı değerleridir.

4.  $E_i$ ,  $F_i$  ve  $Q_i$  değerleri küçükten büyüğe sıralanır.
5. Kabul edilebilir ( $C_1$ ) ve kabul edilebilir istikrar ( $C_2$ ) kümeleri belirlenir.

Herhangi bir alternatifin  $C_1$  kümesinde yer alabilmesi için Eşitlik 18'de gösterilen koşulu sağlaması gerekmektedir.

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq DQ \quad (18)$$

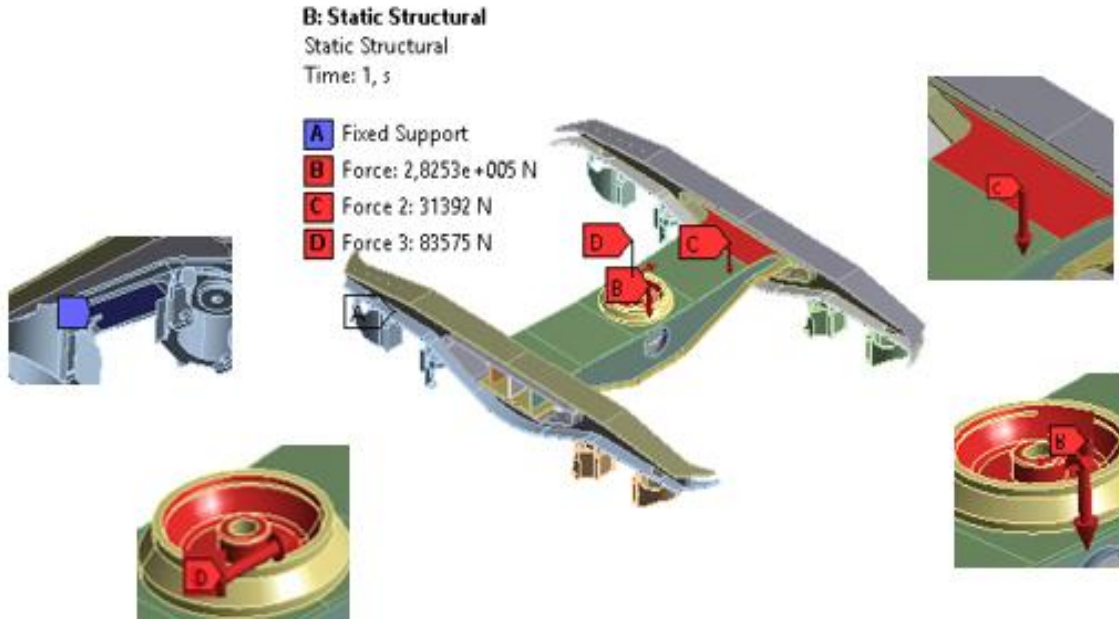
$DQ$  değeri; m alternatif sayısı olmak üzere  $(1/(1-m))$  ile hesaplanmaktadır.  $Q_j$  sıralamasına göre  $A_2$  alternatifi  $A_1$  alternatifinden sonraki sırada yer alıyorsa  $A_1$  karar noktası  $C_1$  grubunda yer alır.  $C_2$  kümesi ise  $E_i$ ,  $F_i$  ve  $Q_i$  sıralamalarının tamamında aynı sırada yer alan alternatiflerden oluşmaktadır. Diğer yaklaşımların aksine küçük  $Q_i$  değeri en iyi sonucu vermektedir.

## 6. Bulgular ve Tartışma (Findings and Discussion)

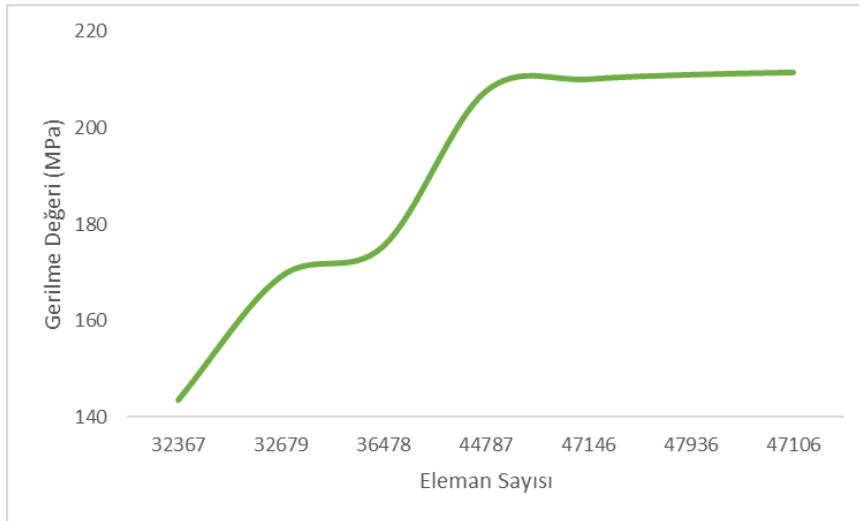
Çok kriterli karar verme uygulamalarında birinci adım karar parametrelerinin ağırlıklarının belirlenmesidir. Bu aşama ilgili parametrenin ne oranda önemli olduğunu göstermektedir. Toplam 100 üzerinden yapılan ağırlıklandırma, 100 puanlık katsayı önem büyüklüğüne göre parametrelere dağıtılmaktadır. Mevcut çalışmada emniyet katsayısı için %60 (0,60), birim fiyat için %15 (0,15) ve kaynak edilebilirlik parametresi için de %25 (0,25) ağırlık oranı belirlenmiştir. Emniyet katsayısı boji tasarımında %60 ağırlıkla en önemli parametre olarak dikkate alınmıştır. Bojinin temel görevi vagonu ve vagona uygulanan yükleri emniyetli bir şekilde sonsuz ömür verecek şekilde taşımaktır. Bu sebeple bojinin varlık sebebini gerçekleştirebilmesi güvenilirlik değerine bağlıdır. Güvenirliği düşük olan bir boji hem yük-yolcu hem de seyir emniyeti açısından riskli duruma düşecektir. Raylı sistem araçlarında araç maliyeti, taşınan yük maliyeti, olası kazalar sebebiyle oluşan maliyetler düşünüldüğünde boji emniyetinin (mukavemetinin) en temel karar kriteri olduğu görülmektedir.

Boji imalatında çok sayıda metalik parça kaynaklı yöntemle birleştirilmektedir. Parça birleştirme işlemlerinin başarısı mekanik sistemin başarısının temel unsurlarındandır. Kaynak işleminin başarısını da birleştirilen malzemelerin kaynak edilebilirliği belirlemektedir. Bu sebeple bojinin varlık sebebini istenilen koşullarda gerçekleştirebilmesi, güvenilirlik katsayısının yüksekliğinden sonra, boji parçalarının iyi kaynak edilmiş olmasına bağlıdır. Çalışma kapsamında kaynak edilebilirlik için %25 ağırlık ile 2. sırada önem katsayısı belirlenmiştir. 3. sırada önemli olarak da %15 ile birim fiyat yani malzeme maliyeti unsuru dikkate alınmıştır. Ekonomiklik, mühendislik tasarımları için emniyet göz ardı edilmeden göz önünde bulundurulması gereken unsurlardan bir tanesidir. Tasarımın çok daha ekonomik olması için emniyet unsurları yetersiz bırakılırsa, uzun veya kısa vadede telafisi zor ve maliyetli (kazalar, sık arıza verme, engellenemeyen titreşim vb.) durumlarla karşılaşılabilir. Bu sebeple mevcut çalışma kapsamında ekonomiklik dikkate alınmış fakat etki oranı düşük belirlenmiştir.

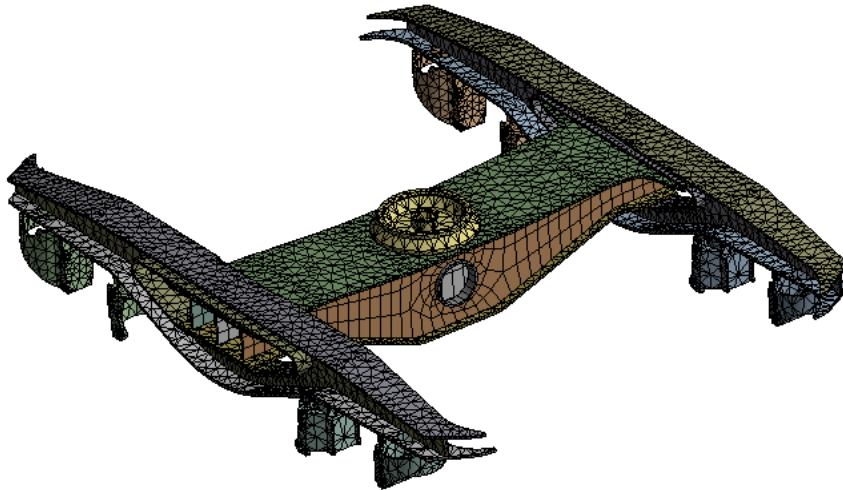
Boji tasarımı ve analizinde, gerilme dağılımı ve bojinin emniyet katsayısı önemlidir. Emniyet katsayısının hesabı için Y25 bojisinde meydana gelen gerilme dağılımlarının belirlenmesi gerekmektedir. Tasarımı yapılan Y25 boji statik analiz gerçekleştirilmesi için ANSYS Sonlu Elemanlar Programına aktarılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri Ansys Workbench yazılımının "Static Structural" modülü kullanılarak 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizi modelleri oluşturulurken sırasıyla katı modelin çizilmesi, sınır şartlarının modele uygulanması, malzeme özelliklerinin programa girilmesi ve çözüm yapıp değerlendirilmesi aşamaları izlenmiştir. Boji katı modeli CATIA 3 boyutlu modelleme programı kullanılarak çizilmiş ve "stp" formatında kayıt edilmiştir. Daha sonra Ansys Workbench programına aktarılmış ve sonlu elemanlar modeli ağ örülerek oluşturulmuştur. Sonlu eleman tipi olarak 3 boyutlu 10 düğüm noktalı yapısal katı tipi tetrahedral eleman kullanılmıştır. Şekil 5'te gösterilen sınır şartları modele uygulanmıştır. Şekil 5'te A noktası ile ifade edilen yer bojinin sabitlendiği kısımdır. Boji A noktasında gösterilen 4 noktadan sabitlenerek analizler uygulanmıştır. Pivottan dik uygulanan kuvvet B, sağ tarafa yanal uygulanan kuvvet ise D noktası olarak ifade edilmiştir. C noktası ile ifade edilen kısım ise bojinin sağ eğimli dönme durumunda maruz kaldığı kuvveti ifade etmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinde optimum sonucu elde etmek için mesh yakınsama analizleri yapılmıştır. Bu amaçla 55-90 mm arası 7 farklı eleman boyutunda 32367, 32679, 36478, 44787, 47146, 47936 ve 48106 eleman sayılarında modeller analize tabi tutulmuştur. Elde edilen maksimum gerilmeler açısından değerlerin karşılaştırılması için mesh yakınsama grafiği çizdirilmiştir (Şekil 6). 44787 eleman için 100788 ağ örgü sayısı optimum değerler olarak belirlenmiş ve belirlenen eleman sayıları ile bojiye ağ örgüsü yapılmıştır (Şekil 7).



Şekil 5. Kuvvetlerin gösterimi (Representation of forces)



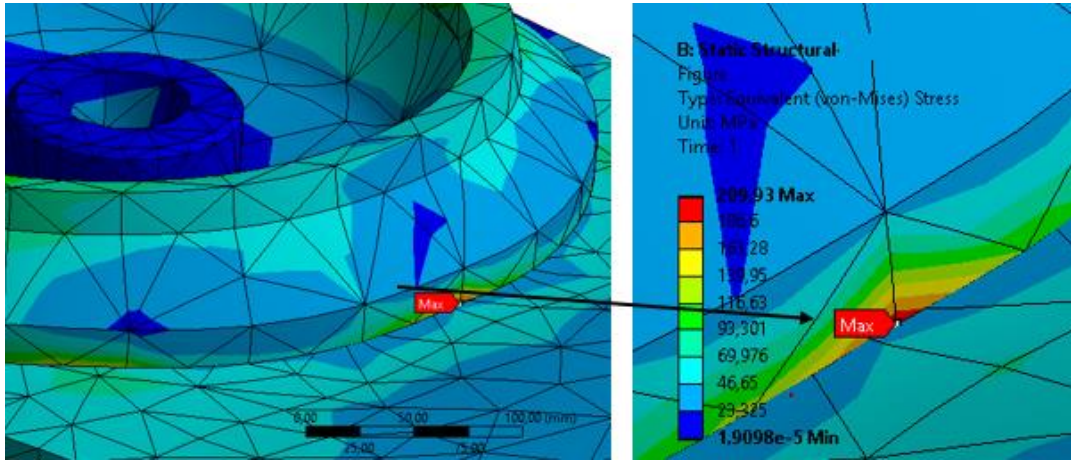
Şekil 6. Mesh yakınsama grafiği (Mesh convergence chart)



Şekil 7. Analiz için ağ örgüsü (Meshwork for analysis)

Boji şasisinde meydana gelen gerilmeler Şekil 8'de gösterilmiştir. Bojiye uygulanan statik kuvvetler; dik yönde pivot kısmından 282.530 N, bolsterin sağ kısmından 31.392 N ve yatay yönde ise 83.575 N luk olarak etki

etmektedir. Analiz sonucu pivotta meydana gelen 209,93 MPa'lık gerilme, seçilen malzemelerin akma değerlerinden küçük olduğu için, belirlenen malzemelerle üretilecek Y25 bojisi güvenlidir (Şekil 8). Bulunan gerilme değeri 40 ton yük altında çalışacak bir konstrüksiyon için anlamlılık taşımaktadır. Makine imalatında kullanılabilen en düşük dayanımlı çelik malzemenin yaklaşık 235 MPa (S235) akma gerilmesi olduğu düşünülürse, hesaplanan 209,93 MPa'lık gerilme değerinin endüstriyel açıdan emniyetle taşınabilecek bir seviyede olduğu görülmektedir. Şasi üzerine monte edilen yük vagonlarının ağırlık merkezlerinin pivot ile aynı ekseninde olması sebebiyle, maksimum gerilmenin pivot parçasında çıkması da anlamlıdır (Bilgin, 2015). Vagon yükünün pivot yataklama noktası üzerinden boji şasisine dağılması sebebiyle, pivot ile bolsterin ilk temas noktaları hem kesme hemde maksimum eğilme zorlanmalarına maruz kalacaktır (iki ucundan ankastre ve orta noktasından yüklenmiş kiriş problemi örneği). Maksimum gerilmenin olduğu nokta için hesaplanan maksimum çökme miktarı 1,498 mm'dir. 2,5 metre uzunluğundaki boji parçası için 1,498 mm'lik çökme değeri plastisite teorisi açısından kabul edilebilir limitler dahilindedir (çelik malzemeler için metre başına 0,2 mm). Emniyet katsayılarının belirlenebilmesi için seçilen malzemelerin özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Tablo 6'da malzemelerin mekanik özellikleri verilmiş ve bu değerlere göre emniyet katsayıları hesaplanmıştır.

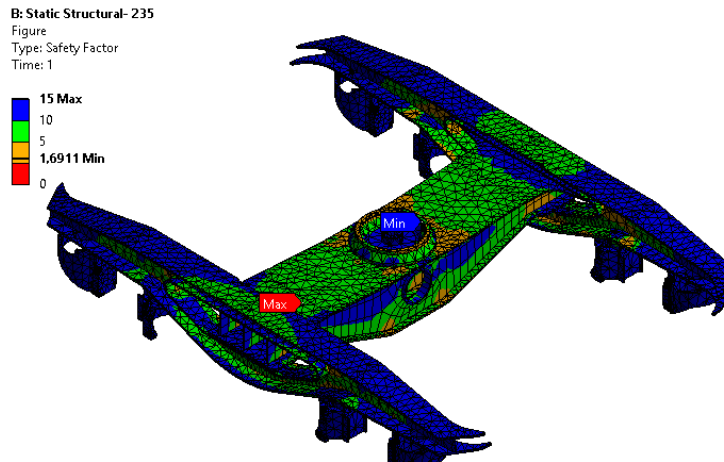


Şekil 8. Bojide meydana gelen maksimum gerilme (Maximum stress in bogie)

Tablo 5. Seçilen yapı çeliklerinin özellikleri (URL6) (Properties of selected structural steels)

	Akma Dayanımı ( $\sigma_{akma}$ )	Çekme Dayanımı ( $\sigma_{çekme}$ )	Uzama (%)
S235	235 MPa	360-510 MPa	19 mm
S275	275 MPa	410-560 MPa	19 mm
S355	355 MPa	510-680 MPa	18 mm

Analizin gerçekleştirilebilmesi için bojilerin üç ana parçası da aynı malzeme olarak düşünülmüş ve üç farklı boji tasarımı oluşturulmuştur. Her üç tasarımda da maksimum ve minimum gerilmeler beklendiği üzere aynı noktalarda ve aynı değerlerde oluşmuştur (Şekil 9). Her farklı durumda oluşan maksimum gerilme değerleri ( $\sigma_{nominal}$ ) Tablo 6'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Emniyet gerilmesi için maksimum (kırmızı imleç) ve minimum gerilme (mavi imleç) noktaları (Maximum (red cursor) and minimum stress (blue cursor) points for safety stress)



Her bir bojinin emniyet katsayısı " $s = \sigma_{akma} / \sigma_{nominal}$ " bağıntısı dikkate alınarak hesaplanmıştır (Tablo 6). S355 malzemesi S275 ve S235'e göre daha yüksek akma dayanımı değerine sahip olduğu için emniyet katsayısı maksimum değerde çıkmıştır. S275'te S235'e kıyasla yüksek akma dayanımına sahiptir ve 1,31 emniyet katsayısı değeri vermiştir. Makine tasarımında çelik konstrüksiyonlar için minimum emniyet katsayısı 1,5 değeri olarak kabul görmektedir. Bu sebeple, malzeme seçimi sadece emniyet katsayısı değerlerine göre yapılsaydı S355 malzeme en uygun malzeme olarak seçilebilecektir.

**Tablo 6.** Boji malzemelerine göre emniyet katsayıları (Safety coefficients according to bogie materials)

Çelik	Maksimum Gerilme ( $\sigma_{nominal}$ )	Akma Gerilmesi ( $\sigma_{akma}$ )	Emniyet Katsayısı ( $s$ )
S235	210	235	1,11
S275	210	275	1,31
S355	210	355	1,70

Üretimde rol oynayan diğer bir unsur olan malzemelerin kaynaklanabilirlikleri parametresi için Tablo 7'de hesaplanan  $C_{eş}$  değerleri dikkate alınmıştır.  $C_{eş}$  değeri küçük olan malzemenin kaynak edilebilirliği daha iyidir. Tabloya göre seçilen malzemelerden kaynaklanabilirliği en iyi S235 iken, en düşük kaynaklanabilirliğe sahip malzeme ise S355'tir. Çalışmada belirlenen son unsur olan birim fiyatta ise Tablo 3'te ki verilerden yararlanılmıştır. Belirlenen üretim unsurları ve parametreler Tablo 7'deki gibi yazılarak problem matrisi oluşturulmuştur. Yapılan analizler ve belirlenen kriterler neticesinde TOPSIS Yöntemi ve VIKOR Yöntemi ile çok kriterli karar verme işlemi gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 7.** Etki derecelendirme yöntemine göre parametrelerin sınıflandırılması (Classification of parameters according to impact rating method)

Çelik	Emniyet Katsayısı	Birim Fiyat	Kaynak Edilebilirliği
S235	1,11	2650	0,48
S275	1,31	2740	0,50
S355	1,70	2750	0,54
S355-S275	1,70	2743	0,56

TOPSIS yönteminde ilk olarak Eşitlik 8 yardımıyla eşitlik normalleştirilmiştir (Tablo 8).

**Tablo 8.** Normalizasyon tablosu (Normalization table)

Çelik	Emniyet Katsayısı	Birim Fiyat	Kaynak Edilebilirliği
S235	0,225	0,486	0,460
S275	0,266	0,503	0,480
S355	0,3452	0,505	0,518
S355-S275	0,3452	0,504	0,537

İkinci adımda ise ağırlıkları belirlenen unsurların ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisi Eşitlik 9 yardımıyla elde edilmiştir. (Tablo 9).

**Tablo 9.** Ağırlıklandırılmış normalizasyon tablosu (Weighted normalization table)

Çelik	Emniyet Katsayısı	Birim Fiyat	Kaynak Edilebilirliği
S235	0,225	0,073	0,115
S275	0,266	0,075	0,119
S355	0,3452	0,076	0,129
S355-S275	0,3452	0,076	0,134

İdeal çözümler, Eşitlik 10 ve Eşitlik 11 yardımıyla hesaplanmıştır (Tablo 10).

**Tablo 10.** İdeal çözüm tablosu (Ideal solution table)

	Emniyet Katsayısı	Birim Fiyat	Kaynak Edilebilirliği
V <sup>+</sup>	0,345	0,073	0,116
V <sup>-</sup>	0,225	0,076	0,134

Optimum ideal ve negatif ideal çözüm eşitliklerine mesafeler ile ideal çözüme yakınlık değerleri hesaplanarak TOPSIS yöntemine göre en ideal malzeme belirlenmiştir. TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemine göre seçilen malzemelerden en ideal olanı S355'tir (Tablo 11).

**Tablo 11.** İdeal çözüme yakınlık tablosu (Closeness to the ideal solution)

Çelik	Si+	Si-	Pi	Sıralama
S235	0,119	0,019	0,139	3
S275	0,079	0,043	0,351	2
S355	0,015	0,119	0,891	1
S355-S275	0,019	0,120	0,861	

VIKOR yönteminde ilk olarak en yüksek ve en düşük parametreler belirlenmiştir (Tablo 12).

**Tablo 12.** En yüksek ve en düşük parametreler (Highest and lowest parameters)

	Emniyet Katsayısı	Birim Fiyat	Kaynak Edilebilirliği
$X_i^+$	1,7	2650	0,48
$X_i^-$	1,11	2750	0,54

Bir sonraki adımda her bir kriterin  $E_i$  değerleri hesaplanmıştır (Tablo 13).

**Tablo 13.**  $E_i$  değerleri ( $E_i$  values)

Çelik	Emniyet Katsayısı	Birim Fiyat	Kaynak Edilebilirliği
S235	0,600	0	0
S275	0,396	0,135	0,063
S355	0	0,150	0,188
S355-S275	0	0,141	0,250

Tüm parametreler için  $E_i$ ,  $F_i$  ve  $Q_i$  değerleri sırasıyla Eşitlik 16 ve Eşitlik 17 yardımıyla hesaplanarak sonuçlar Tablo 14'te gösterildiği şekilde sıralanmıştır. VIKOR yönteminde diğer yaklaşımların aksine en küçük  $Q_i$  değeri en iyi sonucu vermektedir. VIKOR yöntemine göre de en ideal malzeme S355 çıkmıştır (Tablo 14). 3 alternatif olduğu için  $DQ=0,33$  olarak bulunmuştur. 1.alternatif olan  $P(Q_1)$  değeri 0, ikinci alternatif  $P(Q_2)$  ifadesi ise 0,742 olarak belirlenmiştir. Eşitlik 18 çözüldüğünde ise S355 malzemesinin  $C_1$  kümesinde olduğu görülmektedir.

**Tablo 14.**  $E_i$ ,  $F_i$ ,  $Q_i$  değerleri ve sıralama ( $E_i$ ,  $F_i$ ,  $Q_i$  values and sequencing)

Çelik	$E_i$	$F_i$	$Q_i$	Sıralama
S235	0,6	0,6	1	3
S275	0,594	0,396	0,742	2
S355	0,337	0,188	0	1
S355-S275	0,391	0,25	0,177	

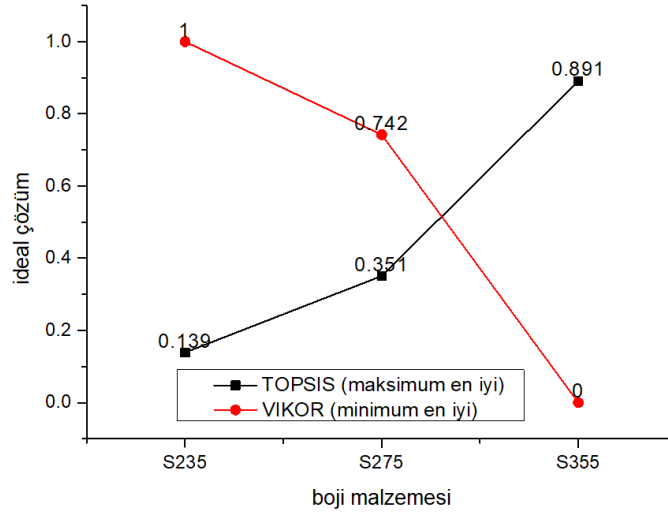
## 7. Sonuçlar (Results)

Çalışma kapsamında mekanik dayanım, imal edilebilirlik ve malzeme maliyeti kavramları birlikte analiz edilerek boji için optimum malzeme belirlenmeye çalışılmıştır. Karar probleminin oluşturulmasında mekanik, malzeme ve maliyet kavramları birlikte kullanılarak entegre bir model oluşturulmuştur. Problemin çözüm aşamasında birden fazla karar kriteri olması sebebiyle çok kriterli karar verme yöntemleri ile çözümleme yapılmıştır.

Çok kriterli problem iki yöntem kullanılarak çözülmüştür. Çok kriterli karar verme yöntemleri olan TOPSIS ve VIKOR yöntemine göre en ideal malzeme S355'tir. İkinci ideal malzeme ise her iki yöntemde de S275 çeliği çıkmaktadır (Şekil 10). Her iki yöntemde benzer sonuç vermesi, oluşturulan problem matrisinin anlamlılığını göstermektedir. S355 çeliği Tablo 7'de verilen problem matrisine göre yüksek emniyet katsayısı sağlaması açısından tercih edilebilir gözükmesine rağmen, kaynak edilebilirlik ve maliyet faktörleri açısından dezavantaj taşımaktadır. TOPSIS ve VIKOR yöntemleri, S355 malzemesinin dezavantajı olmasına rağmen yüksek seçim katsayısı ile S355 malzemenin seçilmesi gerektiği sonucunu vermiştir (TOPSIS için 0,894, VIKOR için 0 değeri) (Şekil 10). Bu durum güvenilirliğin ön planda tutulması ile açıklanabilir. Emniyet katsayısının ağırlık değerinin %60 gibi büyük bir oranda tutulması diğer iki parametrenin etkisini baskılamıştır.

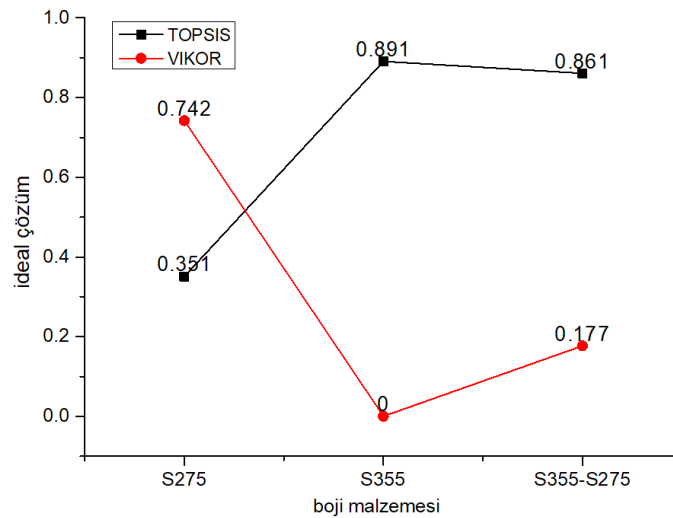
Her iki yöntemde, S355 malzemenin sonra S275 malzemenin 2. sırada tercih edilebileceği sonucunu vermektedir (TOPSIS için 0,3442, VIKOR için 1 değeri) (Şekil 10). S275 malzeme, maliyet ve kaynak edilebilirlik parametreleri açısından S355 malzemeye yakın özelliklere sahip olmasına rağmen, seçim katsayısı değeri bakımında ideal çözüme uzak bir sonuç vermiştir. Şekil 8'den de anlaşılacağı üzere, S275 malzeme için elde edilen değerler S235 malzemeye daha yakın durmaktadır. Bu durumda emniyet katsayısı için belirlenen yüksek ağırlık oranıyla bağlantılıdır. Emniyet katsayısı değeri diğer iki parametreyi güçlü bir şekilde baskılamaktadır. S235 malzeme ise

emniyet katsayısı değerinin kabul edilebilir alt sınır değere ( $s \geq 1$ ) çok yakın olması sebebiyle ideal çözüme çok uzak bir noktada kalmıştır.



Şekil 10. Karar verme grafiği (Decision making chart)

Boji konstrüksiyonu sadece tek bir malzeme ile imal edilmek zorunda değildir. Boji parçaları (Şekil 1) farklı malzemeler kullanarak ayrı ayrı imal edildikten sonra yine kaynaklı imalat ile birleştirilebilir. Çok kriterli karar verme yöntemlerinin burada sağlayacağı fayda uygun malzeme kombinasyonlarının belirlenmesini sağlamaktır. Elde edilen sonuçlar S355 ve S275 malzemesinin en uygun iki malzeme olduğu sonucunu vermiştir. S235 malzemesinin emniyet katsayısının düşük olması ise tasarım mühendisliği açısından kaygı verici olarak karşılanacak bir durumdur. Bu sebeple sadece S355 ve S275 kullanılarak optimum bir konstrüksiyon planlanabilir. S355 yüksek emniyet katsayısı sağlaması sebebiyle en kritik parça olan pivotta (Şekil 1, 4 numaralı makine parçası) kullanılabilir. S275 malzeme ise maliyet unsurunun düşük olması sebebiyle, emniyetin ikinci planda olduğu ve ağırlıkça yüksek miktarda malzeme gereksinimi olan bolster ve taşıyıcı kirişlerde (Şekil 1, 1-3 numaralı makine parçaları) tercih edilebilir. Bu şekilde bir kombinasyon için parametre katsayıları belirlenip tekrar problem matrisi oluşturularak, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerine göre problem tekraren çözülmüştür (Emniyet katsayısı:1,7, Kaynak edilebilirlik:0,56, Birim Fiyat:2744) (Şekil 11). Elde edilen yeni değerler optimum malzemenin tekraren S355 olduğunu göstermektedir. Fakat, S275-S355 malzeme çiftinin S355 malzemesine oldukça yakın değerler verdiği de Şekil 11’de görülmektedir. S355 kullanımı ile S275-S355 malzeme çifti kullanımı arasında, karar verme katsayıları açısından sadece %3’lük bir fark mevcuttur. Çalışmada kullanılan ağırlık katsayılarının sezgisel olarak dikkate alınması sebebiyle %3’lük bir fark, hata sınırları içerisinde dikkate alınabilir. Bu sebeple maliyet unsurları göz önünde bulundurulduğunda S275-S355 çifti optimum tasarım olarak kabul edilebilir.



Şekil 11. Karar verme grafiği (Decision making chart)

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

### Kaynaklar (References)

- Arisoy, D. O., Ahan, O., Müderrisoğlu, K., Bayraktar, M., 2012. Static And Dynamic Analysis Of Railway Wagon Trailer Bogie In Computer Environment, 1. Uluslar arası Raylı Sistemler Mühendisliği Çalıştayı (IWRSE'12), Karabük.
- Bilgin, E., 2015. Y32 Bojisinin Farklı Vagon Ağırlıklarına Adaptasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Khorshidi, R., Hassani, A., 2013. Comparative analysis between TOPSIS and PSI methods of materials selection to achieve a desirable combination of strength and workability in Al/SiC composite, Materials & Design (1980-2015) Volume 52, sayfa 999-1010.
- Kima, J. S., Yoona, H. K., 2011. Structural Behaviors of a GFRP Composite Bogie Frame for Urban Subway Trains under Critical Load Conditions, Procedia Engineering 10, 2375-2380.
- Özsoy, M. İ., 2008. Y32 Bojisinin Bilgisayar Destekli Statik ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Piroğlu, F., Uzgider, E., Çağlayan, Ö. B., Vural, M., 2013. Yapı Çeliklerinin Kaynaklanabilirliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Pektaş, İ., 2017. Raylı Ulaşım Sistemleri Sektör Analizi, Ankara.
- TS EN 13749, Railway Applications - Wheelsets and bogies - Method of specifying the structural requirements of bogie frames, European Committee for Standardization (Brussels, Belgium, 2011).
- UIC 515-4, Passenger Rolling Stock - Trailer Bogies - Running Gear - Bogie Running Gear - Bogie Frame Structure Strength Tests.
- URL1.<http://rayvag.com.tr/urunler/bojiler/y25-isd1-uic-boji/> (30.12.2018)
- URL2.<https://turkish.alibaba.com/product-detail/uic-standard-tsi-certification-bogie-y25-for-european-railway-freight-wagon-60009398100.html/> (30.12.2018)
- URL3.<http://www.akarlojistik.com.tr/vagon-olculeri/> (30.12.2018)
- URL4. <https://www.leecosteel.com/> (30.12.2018)
- URL5.<https://www.slideshare.net/ahmetsonmez37/btnleik-ahp-topsisvikor-uygulamas/> (30.12.2018)
- URL6. <http://turkish.stainlesssteel-sheetmetal.com/> (30.12.2018)
- Uygun R., 2017. Örnek Bir Emu Boji Şasisinin Statik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum
- Ünal, O., Maleki, E., 2018. Shot peening optimization with complex decision-making tool: Multi criteria decision-making, Measurement, 125, 133-141.
- Vladimir, Dr. V. V., 2014. Design and Simulation of Rail Vehicles, Program of Master of Science in Mechatronic Systems Engineering Lawrence Technological University, Michigan.
- Yao-hui, L., Jing, Z., Wu, P., Guan, Q., 2009. Modeling of rigid-flexible coupling system dynamics for railway vehicles with flexible bogie frame, 4th International. Conference on Innovative Computing, Information and Control.



## WEIGHTING THE UNIVERSAL DESIGN PRINCIPLES USING MULTI-CRITERIA DECISION MAKING TECHNIQUES

Yavuz ÖZDEMİR<sup>1\*</sup>, Sahika ÖZDEMİR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yıldız Technical University, Mechanical Faculty, Dept. of Industrial Engineering, Istanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Istanbul Sabahattin Zaim University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Dept. of Interior Architecture and Environmental Design, Istanbul, Türkiye

### Keywords

*Design for All,  
Universal Design,  
Decision Making,  
Multi Criteria Decision  
Making.*

### Abstract

Universal Design (UD) is the design of products and environments that can be used by all people in the widest possible way without the need for adaptation and custom design. It involves a wide range of design disciplines, including environments, products, and communication design. A working group of developers (architects, product designers and environmental design researchers) guided the design process without evaluating existing designs and identified seven UD principles to be used to educate designers and consumers about the properties of more useful products and environments. These principles are “Equitable Use”, “Flexibility in Use”, “Simple and Intuitive Use”, “Perceptible Information”, “Tolerance for Error”, “Low Physical Effort”, and “Size and Space for Approach and Use”. Prioritizing or weighting these principles can be handled as a Multi Criteria Decision Making (MCDM) problem. For this reason, in this paper we study the prioritizing of these principles using two of MCDM techniques with fuzzy numbers, namely AHP and ANP, and the results of both algorithms are compared. The main contribution of this paper is to prioritize UD principles using numerical methods with experts’ view. This work, which includes grading the principle 7 of Universal Design in itself, will be guiding for designers. To the authors’ knowledge, this will be the first interdisciplinary study which uses these two techniques for evaluating UD principles for developers.

## ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİKLERİ KULLANILARAK EVRENSEL TASARIM İLKELERİNİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

### Anahtar Kelimeler

*Herkes İçin Tasarım,  
Evrensel Tasarım,  
Karar Verme,  
Çok Kriterli Karar Verme.*

### Öz

Evrensel Tasarım (UD), adaptasyon ve özel tasarım gerekmeden tüm insanlar tarafından en geniş şekilde kullanılacak ürün ve ortamların tasarımıdır. Ortamlar, ürünler ve iletişim tasarımı dahil olmak üzere çok çeşitli tasarım disiplinlerini içerir. Uzmanlardan oluşan bir çalışma grubu (mimarlar, ürün tasarımcıları ve çevre tasarım araştırmacıları), tasarım sürecini mevcut tasarımları değerlendirerek, tasarımcıları ve tüketicileri daha yararlı ürünlerin ve ortamların özellikleri hakkında eğitmek için kullanılacak yedi UD ilkesini belirlemiştir. Bu ilkeler “Eşit Kullanım”, “Kullanımda Esneklik”, “Basit ve Sezgisel Kullanım”, “Algılanabilir Bilgi”, “Hatalara Dayanım”, “Düşük Fiziksel Çaba” ve “Yaklaşım ve Kullanım için Boyut ve Mekan” dır. Bu ilkelerin önceliklendirilmesi veya ağırlıklandırılması, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemi ile ele alınmıştır. Bu çalışmada, bu ilkelerin, ÇKKV yöntemleri olan AHP ve ANP yöntemleri, bulanık sayılar kullanılarak önceliklendirilmiş ve her iki yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın ana fikri, uzmanların görüşleri ile sayısal

\* İlgili yazar / Corresponding author: yavuzytu@gmail.com, +90-212-692-9856

yöntemler kullanılarak Evrensel Tasarım ilkelerini ağırlıklandırmaktır. Evrensel tasarımın 7 ilkesini kendi içinde derecelendirmeyi içeren bu çalışma, tasarımcılar için yol gösterici olacaktır. Yazarların bilgisine göre bu çalışma, Evrensel Tasarım ilkelerini, uzman görüşlerine göre bu teknikler kullanılarak ağırlıklandırılan literatürdeki ilk disiplinlerarası çalışma olacaktır.

#### Alıntı / Cite

Özdemir, Y., Özdemir, S., (2020). Weighting The Universal Design Principles Using Multi-Criteria Decision Making Techniques, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(1), 105-118.

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

Y. Özdemir, 0000-0001-6821-9867

S. Özdemir, 0000-0002-5762-1962

#### Makale Süreci / Article Process

**Başvuru Tarihi / Submission Date** 27.05.2018

**Revizyon Tarihi / Revision Date** 27.07.2019

**Kabul Tarihi / Accepted Date** 27.11.2019

**Yayın Tarihi / Published Date** 20.03.2020

## 1. Introduction

The number of customers and users who neglect products due to inaccessibility, poor usability, and dissatisfaction with them is increasing. It has been shown that products and services developed for the elderly and the disabled in terms of usability and accessibility are generally beneficial to users.

It has been shown that products and services developed with older usability and accessibility for the elderly and disabled are generally beneficial to users. Where and when they exclude some people using a product or service often find it difficult or frustrating to use.

The aim of universal design; Whether it is buildings, open spaces, communication tools or home furnishings, it is to develop theories, principles and solutions to ensure that everyone uses the same physical solutions as widely as possible.

Within the concept of universal design there is both a vision and a concrete initiative to plan and realize all the buildings, environments and products that can be used by everyone and the children and the elderly in the widest possible extent, in different dimensions and abilities, persons.

The term UD first appeared in the 1980s. In 1985, the architect Ron Mace defined UD as "the design of products and environments to be usable by all people to the greatest extent possible, without the need for adaptation or specialised design." Another early definition described UD as ". . . the universal design approach – designing all products, buildings and interiors to be usable by all people to the greatest extent possible" (Mace, et al., 1990). In 1995, the United Nations' Standard Rules on the Equalization of Opportunities for Persons with Disabilities predicted participation and equal rights for individuals with functional limitations.

The Center for Universal Design defines universal design and the purpose of the concept in the following way (Center of UD, 1997):

"Universal design is the design of products and environments to be usable by all people, to the greatest extent possible, without the need for adaptation or specialized design"

"The intent of the universal design concept is to simplify life for everyone by making products, communications, and the built environment more usable by more people at little or no extra cost. The universal design concept targets all people of all ages, sizes and abilities."

Seven principles of Universal Design (UD) were proposed in 1997 (Center of UD, 1997) to guide developers (designers, product developers and architects) to create more useful mainstream products and more accessible public environments. These principles are "Equitable Use", "Flexibility in Use", "Simple and Intuitive Use", "Perceptible Information", "Tolerance for Error", "Low Physical Effort", and "Size and Space for Approach and Use".

UD has influenced the concepts of "Design for All", "accessible or unobstructed design" and "container design" developed in different socio-cultural and professional environments. A controversial debate discusses the meaning and appropriateness of these terms.

Design for All includes design for everyone, designs for human diversity, social inclusion and equality (Hogan, 2004). Accessible or barrier-free design provides guidelines for people with disabilities to access public open



spaces and commercial facilities (ADA, 1994).

Inclusive design includes a strategic framework and related processes that guide decision makers and product designers in understanding and responding to the needs of different users (British Standard Draft, 2004). The real point thus seems to be a question of justice: to what extent is it possible to design something that, at the same time, allows for equitable use by everyone and respects the diversity in people's capacities (Bianchin and Heylighen, 2018).

Inclusive design prescribes addressing the needs of the widest possible audience in order to consider human differences. Taking differences seriously, however, may imply severely restricting "the widest possible audience" (Bianchin and Heylighen, 2018).

Today, UD goes far beyond lifting barriers and can be seen as guidelines to increase availability for products and environments as much as possible. UD removes discrimination through its implementation and thus promotes social inclusion in all members of society. UD also discusses how appearance affects social perceptions. The UD identifies, for example, targets. breaking physical barriers and redefining disability as a universal state, a state of difference shared by all (Wijk, 1997). This means that UD covers issues such as aging, gender, cultural differences and sustainability.

UD has been strengthened with some important features. First, it extends the design focus to a much wider population than people with disabilities. Second, instead of focusing on UD, restructuring and adaptation, focus on new thinking in the development of initiatives and strategies to produce new solutions; innovative approach. Through the creation of third, UD, a flexible product and environment with good usability, everyone strives for full social participation throughout the entire life span. Everyone is not the only universal solution that fits. It deals with solutions that provide flexibility in use and use.

The purpose can be used by anyone as an integrated architectural quality. There is no natural conflict between the definitions of the architect and the universal design. However, architecture has not been characterized by everyone as an object of functionality. Other factors for design have become more decisive. Over the past few years, development has been taking into account groups with special needs. This usually leads to special solutions in addition to normal solutions. This leads to the separation of groups within the population. The solutions are often the most degraded, if they relate to new projects or adaptations of existing ones. In addition, these solutions are often more expensive than integrated solutions that take into account everything.

In this paper, weighting UD principles and designing according to these weights that are difficult for designers, architects, and interior architects are handled.

Selecting or prioritizing alternatives from a set of available alternatives with respect to multiple criteria is often referred to multi-criteria decision-making (MCDM). MCDM is a well-known branch of a general class of operation research models which deal with decision problems in the presence of a number of decision criteria. This class is further divided into multi-objective decision-making (MODM) and multi-attribute decision-making (MADM). There are several methods in each of the above categories. Priority-based, outranking, distance-based and mixed methods are also applied to various problems. Each method has its own characteristics and such methods can also be classified as deterministic, stochastic and fuzzy methods (Pohekar and Ramachandran, 2004).

Afacan and Demirkan (2010) proposed a priority-based approach for satisfying diverse users' needs, capabilities and expectations in a design process conducted in a computer environment. They applied the planning game technique and the AHP technique using a cost-value approach in prioritising the diverse requirements.

Chou (2012) improved the shortcomings of traditional AHP method and proposed a linguistic evaluation approach for UD with the aim of constructing a hierarchy for evaluation using criteria against the UD principles, developing a convenient and effective eigenvalue algorithm for deriving the weights of criteria, and aggregating preference information and ranking the order of decision alternatives by using linguistic variables.

Yılmaz Kaya and Dağdeviren (2016) proposed an integrated approach to evaluate occupational safety equipment by considering UD and technical requirements. Two MCDM methods, AHP and fuzzy PROMETHEE were employed to handle the evaluation process in their study.

Unlike the above studies, in this paper we apply two MCDM methods to weight the Universal Design principles, namely fuzzy AHP and fuzzy ANP. This is the first paper in the literature to apply these two techniques for the

numerically prioritization of Universal Design principles.

Analytic Hierarchy Process (AHP) is one of the common methods with which to solve MCDM problems. The first application to solve MCDM problem in the literature was Saaty's choosing a school for his son using AHP (Saaty, 1980).

The AHP is an approach that is suitable for dealing with complex systems related to make a choice among several alternatives with providing a comparison of the considered criteria and alternatives. AHP is based on the subdivision of the problem in a hierarchical form. By reducing complex decisions to a series of simple comparisons and rankings, then synthesizing the results, AHP not only helps the analysts to arrive at the best decision, but also provides a clear rationale for the choices made. The objective of using AHP is to identify the preferred alternative and also to determine a ranking of the alternatives when all the decision criteria are considered simultaneously (Mahmoodzadeh et al., 2007).

The analytic network process (ANP) is also another common method with which to solve MCDM problems. The decision problem is structured hierarchically at different levels in the methodology (Mikhailov, 2003). The local priorities in ANP are established by means of pairwise comparisons and judgments (Promentilla et al., 2008). The analytical network process is a generalization of Saaty's Analytical Hierarchy Process, which is one of the most widely employed decision support tools (Promentilla et al., 2006). The priorities in the ANP are assessed indirectly by means of pairwise comparison judgments (Mikhailov and Singh, 2003).

ANP is a useful tool for prediction and for representing a variety of competitors, their assumed interactions and their relative strengths to wield influence in making a decision (Tuzkaya et al., 2010).

The rest of this paper is organized as follows: a brief description about Universal Design principles is given in Section 2, the problem definition is described in Section 3. Fuzzy AHP methodology and fuzzy ANP methodology are presented in Section 4 and Section 5, respectively. In Section 6, we show an application of fuzzy AHP methodology and fuzzy ANP methodology in prioritization of Universal Design principles. Computational results are given in this section. Finally, comparison of the results and future research directions are discussed in Section 7, which concludes the paper.

## 2. Universal Design Principles

Universal design, that is, usability by all people, should be seen as one of the factors that creates this integrity to provide us with good environments. Universal design principles can be seen as a link in the quality assurance process that follows the product or project from the beginning of the planning process to the final result.

To make the UD concept more useful, the Universal Design Center at North Carolina State University has developed seven principles aimed at supporting the evaluation of existing designs, guiding the design process, and having information about designers and consumers of more useful products and environments.

The seven Universal Design principles are presented below (Story et al., 2001):

### PRINCIPLE ONE: Equitable Use

The design is useful and marketable to people with a diverse range of abilities.

### PRINCIPLE TWO: Flexibility in Use

The design accommodates a wide range of individual preferences and abilities.

### PRINCIPLE THREE: Simple and Intuitive Use

Use of product or service is easy to understand, regardless of the user's experience, knowledge, language skills, or current concentration level.

### PRINCIPLE FOUR: Perceptible Information

The design communicates necessary information effectively to the user, regardless of ambient conditions or the user's sensory abilities.

**PRINCIPLE FIVE: Tolerance for Error**

The design minimises hazards and the adverse consequences of accidental or unintended actions.

**PRINCIPLE SIX: Low Physical Effort**

The design can be used efficiently and comfortably and with a minimum of fatigue.

**PRINCIPLE SEVEN: Size and Space for Approach and Use**

Appropriate size and space is provided for approach, reach, manipulation, and use, regardless of user's body size posture or mobility.

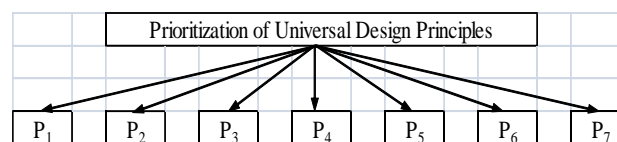
In addition to these principles, considerations must be given to a whole series of other conditions in the process of planning and development. These may include social considerations, economy, aesthetic design, sustainable development, cultural qualities etc (Aslaksen et al., 1997).

**3. Problem Definition**

As we explained above, Universal Design principles are crucial in today's world. Prioritizing the Universal Design principles was chosen for this study and fuzzy AHP and fuzzy ANP approaches were used. We asked five sector experts with the same weights (namely architect, interior architect and designer) about the problem of determining the most important principle. Seven principles were weighted accordingly.

In the numerical example, the architect, the interior architect, and the designer need to prioritize the Universal Design principles. For this problem, seven principles that were defined in the literature are handled as criteria, as seen in Figure 1. The arrows in Figure 1 represent the hierarchy of the problem.

The Universal Design principles that were handled as criteria in this paper are; "Equitable Use (P1)", "Flexibility in Use (P2)", "Simple and Intuitive Use (P3)", "Perceptible Information (P4)", "Tolerance for Error (P5)", "Low Physical Effort (P6)", and "Size and Space for Approach and Use (P7)".



**Figure 1.** Hierarchy of the problem

**4. Fuzzy AHP Methodology**

Analytic Hierarchy Process (AHP) is one of the common methods with which to solve MCDM problems. The decision problem is structured hierarchically at different levels in this methodology (Mikhailov, 2003). The local priorities in AHP are established using pairwise comparisons and judgments (Promentilla et al., 2008). The priorities in the AHP are assessed indirectly from pairwise comparisons judgments (Mikhailov, 2003).

AHP had been applied in a variety of contexts: from the simple everyday problem of selecting a school to the complex problems of designing alternative future outcomes of a developing country, evaluating political candidacy, allocating energy resources, and so on (Ozdogoglu and Ozdogoglu, 2007).

To have a significant impact on the performance of the building with respect to the various design criteria, Nassar et al. (2003) developed a computer tool for selecting the best combination of building assemblies for each particular design situation. They used AHP to determine the relative importance weights for the different criteria.

To select equipments for construction projects Shapira and Goldenberg (2005) presented a selection model based on AHP with a view to providing solutions for the systematic evaluation of soft factors, and the weighting of soft benefits in comparison with costs.

Bitarafan et al. (2012) selected the appropriate method which can consider all the criteria of reconstructing the damaged areas that can be useful for decision makers in managing crises. They introduced the AHP method for calculating the relative importance of the criteria and their weights.

The fuzzy AHP technique can be viewed as an advanced analytical method developed from the traditional AHP. The AHP's subjective judgment, selection and preference of decision-makers have great influence on the success of the method. The conventional AHP still cannot reflect the human thinking style. Avoiding these risks on performance, the fuzzy AHP, an extension of AHP with fuzzy numbers, was developed to solve the hierarchical fuzzy problems. Buckley extended Saaty's AHP to the case where the evaluators are allowed to employ fuzzy ratios in place of exact ratios to handle the difficulty for people to assign exact ratios when comparing two criteria and derive the fuzzy weights of criteria by geometric mean method (Hsieh et al., 2004).

In the literature many researchers (Laarhoven and Pedrycz, 1983; Buckley, 1985a; Buckley, 1985b; Boender et al., 1989; Chang, 1996; Ribeiro, 1996; Lootsma, 1997) who had studied the fuzzy AHP, had provided evidence that fuzzy AHP shows relatively more sufficient description of these kind of decision making processes compared to the traditional AHP methods (Ozdagoglu and Ozdagoglu, 2007).

Fuzzy AHP can be used for the evaluation and ranking of alternatives (Kahraman et al., 2004; Mikhailov and Tsvetnikov, 2004; Rodríguez et al., 2013). Buyukozkan et al. (2008) proposed fuzzy AHP method to evaluate e-logistics-based strategic alliance partners. Cascales and Lamata (2008) proposed fuzzy AHP for management maintenance processes where only linguistic information was available. Alias et al. (2009) used F-AHP technique to rank alternatives to find the most reasonable and efficient use of river system.

Zeng et al. (2007) presented a risk assessment methodology to cope with risks in complicated construction situations. A modified analytical hierarchy process with fuzzy numbers was used to structure and prioritize diverse risk factors. An illustrative example on risk analysis in a shopping centre was used to demonstrate their proposed methodology.

Pan (2008) presented a fuzzy AHP model to select an appropriate bridge construction method. A case study involving an actual highway project was presented to illustrate the use of the proposed model in the paper. Also the use of the model and the capability of the model were shown with the results.

Pan (2009) presented a fuzzy AHP approach to select an appropriate excavation construction method. A case study concerning a foundation construction project was presented in the paper. The author used Buckley's fuzzy AHP approach to analyze the problem.

Nieto-Morote and Vila (2011) presented a risk assessment methodology based on the fuzzy sets theory and on the AHP. In this paper, a problem on risk assessment of a rehabilitation project of a building had been presented as a numerical example.

Kog and Yaman (2014) analyzed 133 peer-reviewed academic studies that published between 1992 and 2013 and classified them as contractor selection, contractor pre-qualification and weighting criteria. According to their paper, the statistical models, fuzzy set theory, and AHP are the most preferred methods in order to solve contractor selection problem.

Taylan et al. (2014) used analytic tools to evaluate the construction projects and their overall risks under incomplete and uncertain situations. They categorized the construction projects using fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies. In their study Fuzzy AHP was used to create weights for fuzzy linguistic variable of construction projects overall risk. For the application thirty construction projects were studied with respect to five main criteria: time, cost, quality, safety and environment sustainability. Their results showed that these methodologies are able to assess the overall risks of construction projects, select the project that has the lowest risk with the contribution of relative importance index.

Andric and Lu (2016) proposed a framework of disaster risk assessment combining Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) with fuzzy knowledge representation and fuzzy logic techniques into a single integrated approach. They applied FAHP approach to ranking risk factors since it is more systematic, accurate and effective than traditional AHP.

Ozdemir and Ozdemir (2018) studied the evaluation of store plan alternatives produced with shape grammar using fuzzy AHP and fuzzy ANP. Then they compared the obtained results of these techniques.

In the F-AHP and F-ANP, to evaluate the decision-makers' preferences, pairwise comparisons are structured using triangular fuzzy numbers  $(a_l, a_m, a_u)$ . The  $m \times n$  fuzzy matrix can be given as in Eq. 1. The element  $a_{mn}$  represents

the comparison of the component  $m$  (row element) with component  $n$  (column element). If  $\tilde{A}$  is a pairwise comparison matrix (Eq. 1), it is assumed that the reciprocal, and the reciprocal value, i.e.  $1/a_{mn}$ , is assigned to the element  $a_{mn}$  (Tuzkaya and Onut, 2008; Tuzkaya et al., 2010):

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} (1,1,1) & a_{12}^l, a_{12}^m, a_{12}^u & \dots & a_{1n}^l, a_{1n}^m, a_{1n}^u \\ \left(\frac{1}{a_{11}^u}, \frac{1}{a_{11}^m}, \frac{1}{a_{11}^l}\right) & (1,1,1) & \dots & a_{2n}^l, a_{2n}^m, a_{2n}^u \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left(\frac{1}{a_{in}^u}, \frac{1}{a_{in}^m}, \frac{1}{a_{in}^l}\right) & \left(\frac{1}{a_{2n}^u}, \frac{1}{a_{2n}^m}, \frac{1}{a_{2n}^l}\right) & \dots & (1,1,1) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Zadeh (1965) introduced the fuzzy set theory to deal with the uncertainty due to imprecision and vagueness. A major contribution of fuzzy set theory is its capability of representing vague data. A triangular fuzzy number that defined as  $(l,m,u)$ , where  $l \leq m \leq u$ , denote the smallest possible value, the most promising value and the largest possible value.

The steps of fuzzy AHP can be listed as follows (Hsieh et al., 2004; Kaya and Kahraman, 2011):

- Step 1: Determine alternatives, criteria and subcriteria to be used in the model
- Step 2: Create a hierarchy including goal, criteria, subcriteria, and alternatives.
- Step 3: Evaluate the relative importance of the criteria using pairwise comparisons. Assign linguistic terms to the pairwise comparisons by asking which criterion is more important than the other with fuzzy numbers.

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \mathbf{1} & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ 1/\tilde{a}_{12} & \mathbf{1} & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/\tilde{a}_{1n} & 1/\tilde{a}_{2n} & \dots & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Step 4: Define the fuzzy geometric mean and fuzzy weight of each criterion.

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in})^{1/n}, \quad \tilde{w}_i \quad (4)$$

$$= \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad (5)$$

where  $\tilde{a}_{in}$  is the fuzzy comparison value of criterion  $i$  to criterion  $n$ , thus,  $\tilde{r}_i$  is the geometric mean of fuzzy comparison value of criterion  $i$  to each criterion,  $\tilde{w}_i$  is the fuzzy weight of the  $i$ th criterion.

Step 5: Defuzzify and normalize the fuzzy weights.

### 5. Fuzzy ANP methodology

The analytic network process (ANP) is a generalization of the analytic hierarchy process (AHP) which can take the inner and outer dependencies among multiple criteria into consideration. ANP is used to determine the priorities of the elements in the network and the alternatives of the goal. ANP allows modeling complex and dynamic environments which are influenced by changing external factors (Meade and Sarkis, 1998). ANP is an excellent methodology which can deal with several issues by considering dependencies between nodes and clusters of criteria (Oztaysi et al., 2011).

Buckley’s fuzzy AHP algorithm (Hsieh et al., 2004; Haghghi et al., 2010; Kaya and Kahraman, 2011) based fuzzy ANP is used for weighting the Universal Design principles in this paper. Fuzzy ANP allows measuring qualitative

factors by using fuzzy numbers instead of crisp values in order to make decisions easier and obtain more realistic results (Oztaysi et al., 2013).

In the literature, the fuzzy ANP method has been used to solve problems like research and development project selection (Mohanty et al., 2005), performance evaluation (Yellepeddi, 2006), quality function deployment implementation (Ertay et al., 2005), enterprise resource planning (ERP) software selection (Ayag and Ozdemir, 2007), tourism type prioritization (Demirel et al., 2010), etc.

Oztaysi et al. (2011) compared the CRM performances of e-commerce firms using a multiple criteria decision making (MCDM) approach - ANP. A sensitivity analysis also provided in order to monitor the robustness of the proposed ANP framework to changes in the weights of evaluation criteria. Their results showed that the ranking among the alternatives are sensitive to changes in the parameters.

Tuzkaya et al. (2010) proposed an integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for selecting material handling equipment. The proposed approach utilizes fuzzy sets, ANP and the preference ranking organization method for enrichment evaluations (PROMETHEE).

Tuzkaya and Onut (2008) proposed a model for selecting the most convenient transportation mode by considering the effects of criteria on the alternative modes and relations among the criteria clusters and subcriteria using fuzzy ANP.

Buyukozkan et al. (2004) used fuzzy ANP to prioritize design requirements by taking into account the degree of the interdependence between customer needs and design requirements and their dependence.

Ebrahimnejad et al. (2012) studied a construction project problem with multiple criteria in a fuzzy environment and proposed a new two-phase group decision-making approach. This approach integrated a modified analytic network process (ANP) and an improved compromise ranking method, VIKOR.

Zhou et al. (2013) proposed a flexibility measurement model of enterprise resources planning (ERP) based on a fuzzy analytic network process (FANP). Hung et al. (2012) applied the fuzzy analytic network process model to evaluate the strategic impact of new integrated circuit (IC) manufacturing technologies within Taiwan's packaging industry.

The steps of fuzzy ANP can be listed as follows (Yasmin et al., 2013):

Step 1: Determine alternatives, criteria and subcriteria to be used in the model

Step 2: Create a network including alternatives, criteria, subcriteria, inner and outer dependencies among the model.

Step 3: Construct pairwise matrices of the components by the experts with fuzzy numbers.

Step 4: Construct the fuzzy comparison matrix by using triangular fuzzy numbers:

Step 5: Calculate fuzzy eigen value to find whether the constructed matrix is consistent or not:

To verify the consistency of the comparison matrix, Saaty proposed a consistency index (C.I.) and consistency ratio (C.R.). The consistency index of a matrix is given by

$$C.I. = (\lambda_{\max} - n)/(n-1) \quad (6)$$

$$C.R. = C.I./R.I \quad (7)$$

where, R.I is Random Consistency Index. The consistency index should be less than or equal to 0.10.

Step 6: Forming initial supermatrix of the network of ANP is composed by listing all nodes horizontally and vertically.

Step 7: Obtaining weighted supermatrix by multiplying the unweighted supermatrix with the corresponding cluster priorities

Step 8: Calculating limited supermatrix by limiting the weighted supermatrix by raising it to sufficiently large power so that it converges into a stable supermatrix (i.e, all columns being identical).

## 6. Application: Evaluation of Universal Design Principles

In this paper we apply two MCDM methods to weight the Universal Design principles, namely fuzzy AHP and fuzzy ANP. Then, the obtained results of these techniques are compared. The layout of the application case can be seen from Figure 2.

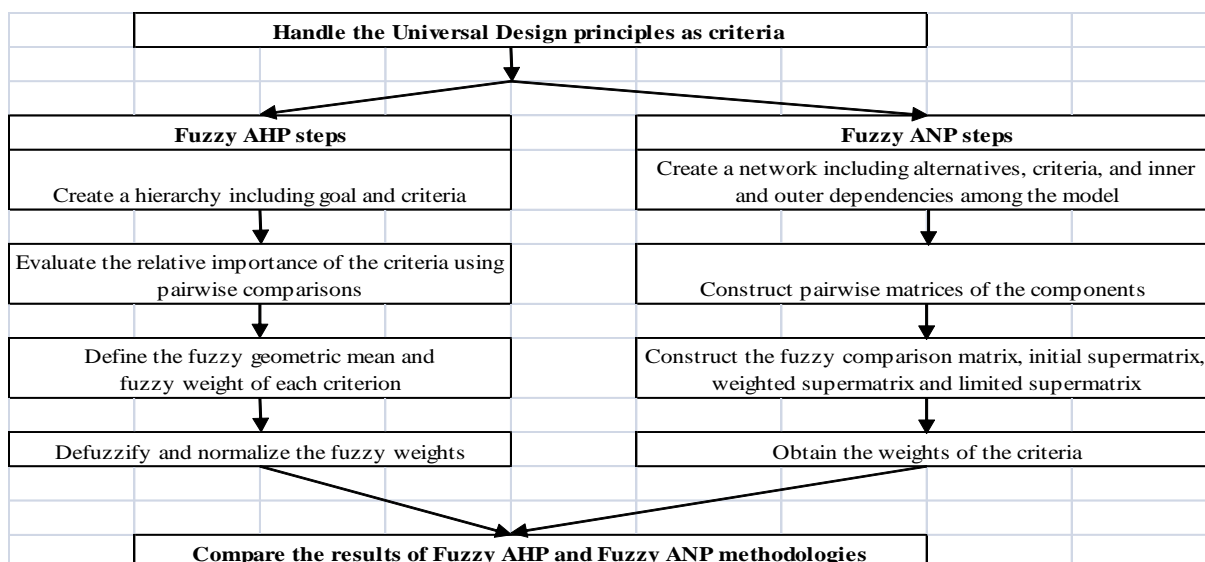


Figure 2. The layout of the application case

### 6.1. Computational Results of Fuzzy AHP Methodology

To solve the problem using fuzzy AHP, we used fuzzy numbers as shown in Table 1 and compared our results with those of experts. Evaluations of the criteria by five experts can be seen in Table 2. Different experts' assessments are aggregated using arithmetic mean method. A triangular fuzzy number that defined as (l, m, u), where  $l \leq m \leq u$ , denote the smallest possible value, the most promising value and the largest possible value. E1, E2, E3, E4, and E5 denote experts' evaluations, respectively.

The fuzzy weight matrix of the criteria according to the goal is given in Tables 3. The evaluation and the methodology described above produced the results shown in Table 4.

Table 1. Relationship between fuzzy numbers and degrees of linguistic importance

Low/high Levels		Fuzzy Numbers
Label	Linguistic Terms	
E	Just equal	(1,1,1)
SL	Slightly Low	(1,1,3)
M	Middle	(1,3,5)
SH	Slightly High	(3,5,7)
H	High	(5,7,9)
VH	Very High	(7,9,9)
EH	Extra High	(9,9,9)

Table 2. Average values used in Fuzzy AHP and Fuzzy ANP

Criteria	Importance Value	E1			E2			E3			E4			E5										
		l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u								
P1	H	5	7	9	H	5	7	9	VH	7	9	9	H	5	7	9	VH	7	9	9	SH	3	5	7
P2	VH	7	9	9	EH	9	9	9	EH	9	9	9	H	5	7	9	EH	9	9	9	SH	3	5	7
P3	H	5	7	9	SH	3	5	7	H	5	7	9	EH	9	9	9	VH	7	9	9	M	1	3	5
P4	SH	3	5	7	SH	3	5	7	SH	3	5	7	EH	9	9	9	SL	1	1	3	H	5	7	9
P5	H	5	7	9	VH	7	9	9	VH	7	9	9	H	5	7	9	M	1	3	5	H	5	7	9
P6	H	5	7	9	EH	9	9	9	H	5	7	9	VH	7	9	9	SL	1	1	3	H	5	7	9
P7	EH	9	9	9	EH	9	9	9	EH	9	9	9	VH	7	9	9	EH	9	9	9	EH	9	9	9



**Table 3.** Fuzzy weight matrix of the criteria according to the goal

	l	m	u
P1	0.08	0.16	0.29
P2	0.08	0.16	0.47
P3	0.06	0.12	0.23
P4	0.03	0.09	0.17
P5	0.06	0.12	0.23
P6	0.06	0.12	0.23
P7	0.08	0.24	0.62

**Table 4.** Results of the application using Fuzzy AHP

Criteria	Weights	Ranking
P1	14.34%	3
P2	19.13%	2
P3	11.12%	4
P4	7.91%	5
P5	11.12%	4
P6	11.12%	4
P7	25.26%	1

According to the results in Table 4 the ranking is obtained as P7>P2>P1.

### 6.2. Computational Results of Fuzzy ANP Methodology

To solve the problem using fuzzy ANP, we used fuzzy numbers as shown in Table 1 and compared our results with those of experts. Evaluations of the principles by five experts were the same as the values of the fuzzy AHP that can be seen in Table 2 and Table 3. Also initial supermatrix, weighted supermatrix and the limited supermatrix can be seen from Table 5-7. The evaluation and the methodology described above produced the results shown in Table 8.

**Table 5.** Initial supermatrix

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
P1	0.00000	0.17736	0.16137	0.15574	0.16137	0.16137	0.19190
P2	0.22335	0.00000	0.21526	0.20774	0.21526	0.21526	0.25598
P3	0.12982	0.13751	0.00000	0.12075	0.12511	0.12511	0.14878
P4	0.09230	0.09777	0.08896	0.00000	0.08896	0.08896	0.10579
P5	0.12982	0.13751	0.12511	0.12075	0.00000	0.12511	0.14878
P6	0.12982	0.13751	0.12511	0.12075	0.12511	0.00000	0.14878
P7	0.29489	0.31235	0.28419	0.27428	0.28419	0.28419	0.00000

**Table 6.** Weighted supermatrix

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
P1	0.00000	0.17736	0.16137	0.15574	0.16137	0.16137	0.19190
P2	0.22335	0.00000	0.21526	0.20774	0.21526	0.21526	0.25598
P3	0.12982	0.13751	0.00000	0.12075	0.12511	0.12511	0.14878
P4	0.09230	0.09777	0.08896	0.00000	0.08896	0.08896	0.10579
P5	0.12982	0.13751	0.12511	0.12075	0.00000	0.12511	0.14878
P6	0.12982	0.13751	0.12511	0.12075	0.12511	0.00000	0.14878
P7	0.29489	0.31235	0.28419	0.27428	0.28419	0.28419	0.00000

**Table 7.** Limited supermatrix

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
P1	0.14702	0.14702	0.14702	0.14702	0.14702	0.14702	0.14702
P2	0.18514	0.18514	0.18514	0.18514	0.18514	0.18514	0.18514
P3	0.11827	0.11827	0.11827	0.11827	0.11827	0.11827	0.11827
P4	0.08713	0.08713	0.08713	0.08713	0.08713	0.08713	0.08713
P5	0.11827	0.11827	0.11827	0.11827	0.11827	0.11827	0.11827
P6	0.11827	0.11827	0.11827	0.11827	0.11827	0.11827	0.11827
P7	0.22591	0.22591	0.22591	0.22591	0.22591	0.22591	0.22591

**Table 8.** Results of the application using Fuzzy ANP

Criteria	Weights	Ranking
P1	14.70%	3
P2	18.51%	2
P3	11.83%	4
P4	8.71%	5
P5	11.83%	4
P6	11.83%	4
P7	22.59%	1

According to the results in Table 8 the ranking is obtained as P7>P2>P1.

The impact of interactivity among the criteria in fuzzy ANP is the reason of the variations in the weights.

Given these results, it is fair to say that paying attention to Principle P7 is the most reasonable outcome, followed by the others (Table 9).

**Table 9.** Comparison of the results using Fuzzy AHP and Fuzzy ANP

Criteria	AHP		ANP	
	Weights	Ranking	Weights	Ranking
P1	14.34%	3	14.70%	3
P2	19.13%	2	18.51%	2
P3	11.12%	4	11.83%	4
P4	7.91%	5	8.71%	5
P5	11.12%	4	11.83%	4
P6	11.12%	4	11.83%	4
P7	25.26%	1	22.59%	1

## 7. Conclusion

The design of the environment is now just a matter of creating beautiful environments and buildings and good architecture; In the finished project the nature implies more and more to meet the demands of qualifications. Good projects are just a few of these aesthetics. All factors must integrate and shape in an integrity that creates good environments, architecture and design. Universal design or usability by all people should become a natural and integral part of the architecture.

In fact, the needs of individuals identified as disabled are not very different from those of the majority or the standard user. Every disabled person has equal freedom and electoral rights at home, work and in the city as a member of society just like other urbanites.

Thoughts for people with disabilities is the center of universal design passion. Often as a social entity, the wishes and requirements of persons with disabilities are the same as those of young, old, women, men, or other individuals described as "standard, normal". It is absolutely necessary for all individuals with different characteristics to spend time together, to have an active or passive activity in a common place, sociologically and psychologically. Keeping a group separate can sometimes mean "stigmatising" or keeping it separate for the group that is kept separate, as opposed to the expected benefit. The concept of "universal design", or design for all, is also

expressed and popularized by this awareness. In this context, people need to settle in their thinking structures as a way of incorporating them into life rather than decoupling the disabled people. However, these issues should be seen in relation to the needs and wants of the rest of the population, whether children, elderly, women, men, or people of different ethnic backgrounds and traditions. As far as possible, there may be different interests and conflicts in these areas to implement a universal design in buildings, open spaces and products. With the different needs of disabled people being central, it is not enough to plan and design the whole population.

In this paper, multi criteria-decision making techniques, fuzzy AHP and fuzzy ANP methods are used for the prioritization of Universal Design (UD) principles. Then, the obtained results of these techniques are compared. As a result of evaluation process, these two MCDM methods, fuzzy AHP and fuzzy ANP, have determined the most suitable result as P7 (Size and Space for Approach and Use). The ranking of the other principles are P2>P1 (Flexibility in Use > Equitable Use) in both methods with close weights and normalized values.

The impact of interactivity among the criteria in fuzzy ANP is the reason of the variations in the weights. The main advantage of the proposed model is to indicate the impact of this interactivity and to evaluate the UD principles using MCDM. The main contribution of this paper is to prioritize UD principles using numerical methods with experts' view.

The general limitation of the proposed model is the costly and exhausting information requested from experts (approx. 30 pairwise comparisons per one expert). Other limitations of the model are the preferences of the expert including uncertainty and conflicts and there is often needed more than one expert to make decisions.

As regards future research, UD principles could be solved by other MCDM techniques with fuzzy numbers to explain interactivity among the criteria, and more solutions compared for principles evaluation processes during designs. Also, the intuitionistic fuzzy sets could be used to handle with the hesitancy of the decision-makers and intelligent software to calculate solutions automatically could be developed.

### Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

### References

- ADA standards for Accessible Design. 1994. 28 CFR Part 36.
- Afacan, Y., Demirkan, H., 2010. A priority-based approach for satisfying the diverse users' needs, capabilities and expectations: a universal kitchen design case. *Journal of Engineering Design* 21, 315-343.
- Alias, M. A., Hashim, S. Z. M., Samsudin, S., 2009. Using fuzzy analytic hierarchy process for southern Johor river ranking. *International Journal of Advances in Soft Computing and its Applications* 1(1), 62-76.
- Andric, J. M., Lu, D. G., 2016. Risk assessment of bridges under multiple hazards in operation period. *Safety Science* 83, 80-92.
- Aslaksen, F., Bergh, S., Bringa, O.R., Heggem, E.K., 1997. *Universal Design and Design for All*, Cornell University ILR School, Gladnet Collection, Norwegian.
- Ayag, Z., Ozdemir, R. G., 2007. An intelligent approach to ERP software selection through fuzzy ANP. *International Journal of Production Research* 45, 2169-2194.
- Bianchin, M., Heylighen, A., 2018. Just design, *Design Studies* 54, 1-22.
- Bitarafan, M., Hashemkhani Zolfani, S., Arefi, S. L., Zavadskas, E. K., 2012. Evaluating the construction methods of cold-formed steel structures in reconstructing the areas damaged in natural crises, using the methods AHP and COPRAS-G. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 12, 360-367.
- British Standard Draft. 2004. *Design Management Systems*, 7000-6.
- Boender, C. G. E., De Graan, J. G., Lootsma, F. A., 1989. Multicriteria decision analysis with fuzzy pairwise comparisons. *Fuzzy Sets and Systems* 29, 133-143.
- Buckley, J. J., 1985a. Ranking alternatives using fuzzy members. *Fuzzy Sets and Systems* 15, 21-31.
- Buckley, J. J., 1985b. Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems* 17, 233-247.
- Buyukozkan, G., Ertay, T., Kahraman, C., Ruan, D., 2004. Determining the Importance Weights for the Design Requirements in the House of Quality Using the Fuzzy Analytic Network Approach. *International Journal of Intelligent Systems* 19, 443-461.
- Buyukozkan, G., Feyzioglu, O., Nebol, E., 2008. Selection of the strategic alliance partner in logistics value chain. *International Journal of Production Economics* 113, 148-158.
- Cascales, M. S. G., Lamata, M. T., 2008. Fuzzy analytical hierarchy process in maintenance problem. In Nguyen NT (eds) *IEA/AIE 2008, LNAI 5027*. Berlin: Springer-Verlag.
- Center for Universal Design., 1997. *Environments and products for all people*. Raleigh: North Carolina State University, Center for Universal Design. Accessed 25/05/2017, from [http://www.design.ncsuedu/cud/univ\\_design/ud.htm](http://www.design.ncsuedu/cud/univ_design/ud.htm).
- Chang, D. Y., 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research* 95, 649-655.
- Chou, J.R., 2012. A linguistic evaluation approach for universal design. *Information Sciences* 190, 76-94.

- Demirel, T., Cetin Demirel, N., Ozdemir, Y., 2010. Prioritization of Tourism Types Using Fuzzy Analytic Network Process. *World Scientific Proceedings Series on Computer Engineering and Information Science* 2, 514-519.
- Ebrahimnejad, S., Mousavi, S. M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Hashemi, H., Vahdani, B., 2012. A novel two-phase group decision making approach for construction project selection in a fuzzy environment. *Applied Mathematical Modelling* 36, 4197-4217.
- Ertay, T., Büyüközkan, G., Kahraman, C., Ruan, D., 2005. Quality function deployment implementation based on Analytic Network Process with linguistic data: An application in automotive industry. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 16, 221-232.
- Haghighi, M., Divandari, A., Keimasi, M., 2010. The impact of 3D e-readiness on e-banking development in Iran: A fuzzy AHP analysis. *Expert Systems with Applications* 37, 4084-4093.
- Hogan, P., 2004. Good Design Enables, Bad Design Disables, EIDDDesign for All Declaration. Internal draft.
- Hsieh, T. Y., Lu, S. T., Tzeng, G. H., 2004. Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings. *International Journal of Project Management* 22, 573-584.
- Hung, Y. H., Huang, M. L., Fanchiang, K. L., 2012. Applying the fuzzy analytic network process to the selection of an advanced integrated circuit (IC) packaging process development project. *International Journal of the Physical Sciences* 7, 281-296.
- Kahraman, C., Cebeci, U., Ruan, D., 2004. Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey. *International Journal of Production Economics* 87(2), 171-184.
- Kaya, T., Kahraman, C., 2011. An integrated fuzzy AHP-ELECTRE methodology for environmental impact assessment. *Expert System with Application* 38, 8553-8562.
- Kog, F., Yaman, H., 2014. A meta classification and analysis of contractor selection and prequalification. *Procedia Engineering* 85, 302-310.
- Laarhoven, P. J. M., Pedrycz, W., 1983. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems* 11, 229-241.
- Lootsma, F., 1997. *Fuzzy Logic for Planning and Decision-Making*. Dordrecht: Kluwer.
- Mace, R. L., Hardie, G. J., Place, J. P., 1991. *Accesible Environments: Towards Universal Design*. Innovation by Design. W.E. Preiser, J.C. Vischer, E.T. White (Eds.). Van Nostrand Reinhold, New York.
- Mahmoodzadeh, S., Shahrabi, J., Pariazar, M., Zaeri, M. S., 2007. Project selection by using fuzzy AHP and TOPSIS technique. *International Journal of Social, Human Science and Engineering* 1(6), 302-307.
- Meade, L., Sarkis, J., 1998. Strategic analysis of logistics and supply chain management systems using the analytical network process. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 34, 201-215.
- Mikhailov, L., 2003. Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgments. *Fuzzy Sets and Systems* 134, 365-385.
- Mikhailov, L., Singh, M. G., 2003. Fuzzy analytic network process and its application to the development of decision support systems. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews* 33, 33-41.
- Mikhailov, L., Tsvetinov, P., 2004. Evaluation of services using a fuzzy analytic hierarchy process. *Applied Soft Computing* 5(1), 23-33.
- Mohanty, R. P., Agarwal, R., Choudhury, A. K., Tiwari, M. K., 2005. A Fuzzy ANP-based approach to R&D project selection: A case study. *International Journal of Production Research* 43, 5199-5216.
- Nassar, K., Thabet, W., Beliveau, Y., 2003. A procedure for multi-criteria selection of building assemblies. *Automation in Construction* 12, 543-560.
- Nieto-Morote, A., Ruz-Vila, F., 2011. A fuzzy approach to construction project risk assessment. *International Journal of Project Management* 29, 220-231.
- Ozdogoglu, A., Ozdogoglu, G., 2007. Comparison of AHP and fuzzy AHP for the multicriteria decision making processes with linguistic evaluations. *Istanbul Commerce University Fen Bilimleri Dergisi* 11, 65-85.
- Ozdemir, S., Ozdemir, Y., 2018. Prioritizing store plan alternatives produced with shape grammar using multi-criteria decision making techniques. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 45(4), 751-771.
- Oztaysi, B., Kaya, T., Kahraman, C., 2011. Performance comparison based on customer relationship management using analytic network process. *Expert Systems with Applications* 38, 9788-9798.
- Oztaysi, B., Ugurlu, S., Kahraman, C., 2013. Assessment of Green Energy Alternatives Using Fuzzy ANP. In Cavallaro F (eds), *Assessment and Simulation Tools for Sustainable Energy Systems* (pp. 55-77). London: Springer.
- Pan, N. F., 2008. Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method. *Automation in Construction* 17, 958-965.
- Pan, N. F., 2009. Selecting an appropriate excavation construction method based on qualitative assessments. *Expert Systems with Applications* 36, 5481-5490.
- Pohekar, S. D., Ramachandran, M., 2004. Application of Multi-criteria Decision Making to Sustainable Energy Planning-A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8, 365-381.
- Promentilla, M. A. B., Furuichi, T., Ishii, K., Tanikawa, N., 2006. Evaluation of remedial countermeasures using the analytic network process. *Waste Management* 26, 1410-1421.
- Promentilla, M. A. B., Furuichi, T., Ishii, K., Tanikawa, N., 2008. A fuzzy analytic network process for multi-criteria evaluation of contaminated site remedial countermeasures. *Journal of Environmental Management* 88, 479-495.
- Ribeiro, R. A., 1996. Fuzzy multiple criterion decision making: A review and new preference elicitation techniques. *Fuzzy Sets and Systems* 78, 155-181.
- Rodríguez, A., Ortega, F., Concepción, R., 2013. A method for the selection of customized equipment suppliers. *Expert Systems with Applications* 40(4), 1170-1176.
- Saaty, T. L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw Hill.
- Shapira, A., Goldenberg, M., 2005. AHP-Based Equipment Selection Model for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management* 131(12), 1263-1273.
- Story, M. F., Mueller, J., Mace, R. L., 2001. *The Universal Design File: Designing for People of all ages and Abilities*. Raleigh, North Carolina State University, USA.

- Taylan, O., Bafail, A. O., Abdulaal, R. M. S., Kabli, M. R., 2014. Construction projects selection and risk assessment by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies. *Applied Soft Computing* 17, 105–116.
- Tuzkaya, G., Gulsun, B., Kahraman, C., Ozgen, D., 2010. An integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for material handling equipment selection problem and an application. *Expert Systems with Applications* 37, 2853-2863.
- Tuzkaya, U. R., Onut, S., 2008. A fuzzy analytic network process based approach to transportation-mode selection between Turkey and Germany: A case study. *Information Sciences* 178, 3133-3146.
- Yasmin, F., Kumar, A., Kumar, A., 2013. Fuzzy Theory Concept Applied in Analytic Network Process. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering* 3, 832-837.
- Yellepeddi, S., 2006. An Analytical Network Process (ANP) approach for the development of a reverse supply chain performance index in consumer electronics industry. PhD Dissertation, The University of Texas, USA.
- Yılmaz Kaya, B., Dağdeviren, M., 2016. Selecting Occupational Safety Equipment by MCDM Approach Considering Universal Design Principles. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* 26(2), 224-242.
- Wijk, M., 1997. Differences we Share, Faculty of Architecture, Delft University of Technology, Netherlands.
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control* 8, 338-353.
- Zeng, J., An, M., Smith, N. J., 2007. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. *International Journal of Project Management* 25, 589–600.
- Zhou, X., Lv, B., Lu, M., 2013. ERP System Flexibility Measurement Based on Fuzzy Analytic Network Process. *Journal of Software* 8, 1943-1951.



## BİR KAMU İDARİ HİZMET BİNASININ MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Cevdet Emin EKİNCİ<sup>1\*</sup>, Nurdan BAYKUŞ<sup>2</sup>, Sevil AY<sup>3</sup>, Melek AKGÜL<sup>4</sup>, Belkis ELYİĞİT<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Kilis, Türkiye

<sup>3</sup> Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu, Artvin, Türkiye

<sup>4</sup> Munzur Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tunceli, Türkiye

<sup>5</sup> Fırat Akademi A.Ş., Elazığ, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*BUD,  
Biyoharmoloji,  
Binaların Mühendislik  
Özellikleri,  
Biyoharmolojik Binalar,  
Kullanıcı Kimliği ve  
Kullanım Amacı.*

### Öz

Bu çalışmada yeni hizmete alınan bir kamu idari hizmet binasının mühendislik özellikleri biyoharmoloji bilimi kapsamında incelenmiş ve Biyoharmolojik Uygunluk Değeri (BUD) belirlenmiştir. Binanın incelemesi 26-27 Mart 2018 tarihlerinde yapılmıştır. Bina incelemesinde toplam 14 mühendislik özellikleri ve kriterleri ele alınmıştır. Yapılan BUD inceleme çalışması sonucunda daha yeni tamamlanan ve hizmete alınan binanın "İyileştirilmeli" sınıfında ve minör değişikliklere ihtiyacı olduğu anlaşılmıştır. Binanın BUD puanı ~434 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca binanın eksiklik ve yetersizlik değeri %32'dir. Binada belirlenen en zayıf ilk üç mühendislik özellik "Mekanik Sistem", "Tefrişat ve Düzenleme" ve "Aydınlatma" şeklindedir. Diğer taraftan binanın en iyi ilk üç mühendislik özelliği ise "Taşıyıcı Elemanlar", "Sismoloji" ve "Kullanıcı Kimliği"dir.

## EXAMINATION OF THE ENGINEERING PROPERTIES OF A PUBLIC ADMINISTRATIVE SERVICE BUILDING

### Keywords

*BCA,  
Bioharmology,  
Engineering Properties of  
Buildings,  
Bioharmological Buildings,  
User Identity and Usage  
Purpose.*

### Abstract

In this study, the engineering properties of a newly constructed public administrative service building were examined within the scope of bioharmology science and the Bioharmological Conformity Assessment (BCA) was determined. The building was examined on 26-27 March 2018. A total of 14 engineering features and criteria were discussed in the building review. As a result of the BCA study, it was understood that the newly completed and newly accessible building needs "Minor Improvements" in its "Rehabilitation" class. BCA of the building score is calculated as ~434. In addition, the lack and inadequacy value of the building is 32%. The weakest first three engineering properties identified in the building are "Mechanical System", "Furnishing and Configuration", "Lighting" and On the other hand, the best first three engineering features of the building are "Carrier Staff", "Seismology" and "User Identity".

### Alıntı / Cite

Ekinci, C.E., Baykuş, N., Ay, S., Akgül, M., Elyiğit, B., (2020) Bir Kamu İdari Hizmet Binasının Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 119 – 130.

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

C. E. Ekinci, 0000-0002-7114-4832  
N. Baykuş, 0000-0002-6199-3363  
S. Ay, 0000-0003-3290-2343  
M. Akgül, 0000-0001-8815-3762  
B. Elyiğit, 0000-0002-2552-1862

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	16.04.2018
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	24.03.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	26.06.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

\*İlgili yazar / Corresponding author: cevdeteminekinci@hotmail.com, +90-535 849 84 68

## 1. Giriş (Introduction)

Kamu idari hizmet binaları, halkın hizmet alabilmesi için devlete bağlı kurumlardan oluşur. Kamu olması devlete bağlı olarak işletildiğini gösterir.

Kamu hizmetlerinin sunumu için gerekli altyapı yatırımlarının arasında kamu binaları da önemli bir paya sahiptir. Yatırım politikaları göz önünde bulundurulduğunda ise kamu binaları gibi düşük katma değer potansiyeline sahip yatırımların öncelikli alanlar içinde yer almadığı ve bu ihtiyaçların ise maliyetinin etkin çözümlerle karşılanması gerektiği anlaşılmaktadır.

Milli Emlak Genel Müdürlüğü 2016 yılı kayıtlarına göre Hazineye ait tescilli taşınmazlar arasında yaklaşık 172000 bina bulunmaktadır ve bu binalar bir milyar m<sup>2</sup> yüz ölçüme sahiptir. Söz konusu büyüklükler göz önünde bulundurulduğunda, kamu binaları alanları verimlilik ve kaynak tasarrufu sağlanması açısından yüksek bir potansiyel taşımaktadır. Bina inşaatlarının birim maliyetlerinin 650 TL/m<sup>2</sup> olduğu varsayımıyla kamuya ait bina stoku yaklaşık 650 milyar TL parasal değere karşılık gelmektedir. Binaların üzerinde bulunduğu arsaların değeri de dikkate alınırsa bu miktar çok daha yüksek mertebelere ulaşmaktadır.

Bahse konu kamu binalarının bir kısmı hastane, okul, karakol, vergi dairesi, kütüphane, adliye gibi vatandaşa doğrudan hizmet verilen binalardan oluşurken, bir kısmı da kamunun idari faaliyetlerinin yürüttüğü binalardan oluşmaktadır. Doğrudan vatandaşa hizmet verilen binalar sağlık, eğitim, kültür, adalet gibi iktisadi ve sosyal sektörlerin ihtiyaçları ve öncelikleri doğrultusunda planlanmaktadır. İdari hizmet binaları ise kamu kuruluşlarının yönetim faaliyetlerini yürüttüğü ve ofis amaçlı kullandığı binalar olarak kurumsal ihtiyaçlar doğrultusunda planlanmaktadır. Söz konusu idari hizmet binaları, bu çalışmanın kapsamını oluşturmaktadır.

Son yıllarda, idari hizmet binası projeleri için kuruluşlar tarafından talep edilen ödenek miktarı, kısıtlı bütçe imkânları göz önünde bulundurulduğu takdirde bile kayda değer büyüklüklere ulaşmaktadır. 2011 yılından itibaren yatırım programına teklif edilen idari hizmet binası projeleri toplu bir şekilde değerlendirilmektedir ve yapılan değerlendirmelerde bina taleplerinin artma eğiliminde olduğu da görülmektedir. 2014 Yılı Yatırım Programı kapsamında toplam proje tutarı 4 milyar TL civarında olan 31 adet proje için yaklaşık 1.5 milyar TL ödenek talep edilmiştir. Yıllar itibarıyla artan idari hizmet binası talepleri ve bu projeler için ihtiyaç duyulan ödenek miktarları bütçe üzerinde de olumsuz bir etkiye sahiptir.

İdari hizmet binalarıyla ilgili herhangi bir teknik kriter seti veya yasal düzenleme olmamasından dolayı projelerin hazırlık ve değerlendirme süreçlerinde eksiklikler bulunmaktadır. Yeterli ön hazırlık yapılmadan geliştirilen projeler yatırım programının uygulanması aşamasında da sorunlar yaşanmasına sebep olabilmektedir. Bunların neticesinde uygulama aşamasında proje kapsamı ve maliyetinde ciddi artışlarla karşılaşmakta ve kaynakların etkin yönetimi ilkesi çerçevesinde bütçe açısından olumsuz durumlar ortaya çıkmaktadır. İdari hizmet binası projelerine yönelik yaklaşım ve sürecin iyileştirilmesinin kamu açısından önemli maliyet tasarrufu getirebileceği değerlendirilmektedir (Porgalı, 2015; MEGM, 2018).

Binaların mühendislik ve mimarlık özelliklerine göre ölçme ve sertifikalandırma ile ilgili metot, sistem ve/veya yaklaşımlar 1990 yılında başlamıştır. Bu konuda yaşanan gelişmelere ilişkin bazı örnekler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1’de verilen sistemler genel amacının doğaya en az zarar veren binaların yapılmasının sağlanması olduğu söylenebilir. Zira, doğaya en az zarar veren binalar günümüzde “Yeşil Bina”, “Çevre Dostu Bina”, “Ekolojik Bina”, “Akıllı Bina”, “Sürdürülebilir Bina” gibi benzer ifadelerle tanımlanmaktadır. Bu binaların hemen hepsinin temel amacı, sürdürülebilir arazi planlaması, su ve enerji, ekolojik malzeme kullanımı, iç ortam hava kalitesi, kullanıcı sağlığı ve konforu, ulaşım ve atıkların kontrolü, akustik ve kirlilik gibi alanlarda belli standartların karşılanmasıdır. Böylece doğayla özdeş yapıların elde edilmesidir (Akman, 1999; Akman, 2005; Erten, 2009; Kincay, 2012; Ekgil ve Ekinci, 2016).

Tablo 1’de verilen sistemler benzer yaklaşım veya prensiplerle binanın nicelik ve niteliği hakkında sahip oldukları hususları ele alıp incelemekte ve değerlendirmektedir. Bu sistemler, binaların incelenmesi sonucu genel olarak puanlama sistemi doğrultusunda değerlendirmelere dayanan metotları içermektedir. İnceleme ve değerlendirme çalışması neticesinde kazanılan puanla birlikte binanın sertifika sınıfı belirlenmektedir.

Ülkemizin hali hazırda resmi bir bina sertifikalandırma sistemi yoktur. Fakat bu konuda çarpıcı iki girişim bulunmaktadır. Bunlar BUD (Biyoharmolojik Uygunluk Değerlendirmesi) ve ÇEDBİK (Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği)’tir. ÇEDBİK, WorldGBC tam üyesi olup yukarıda verilen sistemlerle çok yakın benzer özelliklere sahiptir, denilebilir. ÇEDBİK konut sertifikası kapsamında konutlar; bütünsel yeşil proje yönetimi, arazi kullanımı, su kullanımı, enerji kullanımı, sağlık ve konfor, malzeme ve kaynak kullanımı, konutta yaşam, işletme ve bakım,



yenilikçilik olmak üzere 9 başlık altında değerlendirilmektedir (ÇETBİK, 2017; Porgalı, 2015). Yeşil bina sertifika sistemleri, bina bazındaki projelerin çevre üzerindeki etkilerinin objektif ve somut olarak ortaya konulmasında ve doğal kaynakları korumadaki duyarlılıklarını meydana çıkarmada ölçülebilir bir referans sağlamaya çalışan bir tür derecelendirme sistemi olarak tanımlanmaktadır (Erdede ve Bektaş, 2014).

Binaların tüm yaşam dönemi düşünüldüğünde, enerji tüketimi en büyük maliyete sahip kalemlerden biridir ve enerji kullanımında yapılacak iyileştirmeler binanın yaşam dönemi masraflarının da büyük ölçüde azalmasını sağlayarak ülke ekonomisine önemli katkılarda bulunacaktır (Özyer, 2018).

BUD'un temel ilkesi "binaların kullanıcı kimliği ve kullanım amacına uygun" olmasıdır. Bu husus; binaların mühendislik ve mimarı özelliklerinin yanı sıra yapı fiziği, yapı biyolojisi ve kullanıcı memnuniyeti kapsamında incelenmesini de kapsamaktadır (Ekinci, 2014; Ekinci ve Baykuş, 2015a; Ekinci ve Baykuş, 2015b).

BUD sistemi, binaların canlılar gibi yaşadığını ve binaların canlılar gibi zaman zaman hastalanabilecekleri ve bu nedenle bina kullanıcısıyla tam uyum içinde olması gerektiğini savunmaktadır. Yani, kullanım amacı her ne olursa olsun kullanıcı kimliğiyle bütünleşmeyen veya uyuşmayan binaların sürdürülebilir, çevre dostu, akıllı veya yeşil bina olamayacağını varsaymaktadır (Ekinci, 2008; Ekinci, 2011a; Ekinci, 2011b; Ekinci, 2011c; Ekinci, 2011d; Ekinci, 2012a; Ekinci, 2012b; Ekinci ve Elyiğit, 2012).

Biyoharmoloji bilimi ışığında geliştirilen BUD sistemi direkt insanı ve içinde bulunduğu çevresi ile olan uyum ya da uyumsuzluğunu konu almaktadır (Ekinci, 2006; Ekinci, 2007; Ay, vd., 2016). Bu nedenle binaları ölçme ve sertifikalandırma sürecini "Kullanıcı Kimliği" ve "Kullanım Amacına" göre yapmaktadır. BUD'un binaları değerlendirme kriter-özellik başlıkları, önem katsayıları ve sorgu sayısı ise Tablo 2'de verilmiştir.

BUD'un kuramsal esasları, biyoharmoloji bilim dalı ışığında geliştirilmiştir. Biyoharmoloji geniş bir süreç olup bu süreçte canlıların temel ihtiyaçları olan beslenme, dinlenme, uyuma ve çalışma ortamlarının uygunluk düzeyini incelemektedir. Canlıların bu temel aktivitelerini yerine getirmede kullandığı doğal ya da yapay ortamın nicelik ve niteliğiyle yakından ilgilenmektedir. Buradan hareketle, bir mekanda, insanı olumsuz yönde etkileyen çevresel faktörler öncelikle duyu organlarıyla algılanmakta, bedenin savunma mekanizması bu aşamada devreye girmektedir (Ekinci, vd., 2014; Aksoy, vd., 2015; Ay ve Ekinci, 2016; Bal, vd., 2014).

**Tablo 1.** Öncü bina ölçme ve sertifikalandırma sistemleri (Leading building measurement and certification systems) (Erten, 2009; Erdede ve Bektaş, 2014; ÇEDBİK, 2017).

Yıl	Kısa Adı	Açılımı	Ülke
1990	BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method	İngiltere
1998	LEED	Leadership in Energy and Environmental Design	A.B.D.
2001	CASBEE	Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency	Japonya
2002	GREENSTAR	The Green Building Council of Australia (GBCA)	Avustralya
2007	BCA	Bioharmological Conformity Assessment Biyoharmolojik Uygunluk Değerlendirmesi (BUD)	Türkiye
2009	DGNB	German-Deutsche Sustainable Building Council	Almanya

**Tablo 2.** BUD kriterleri ve önem katsayıları (BUD criteria and significance coefficients) (Ekinci, 2011; Aksoy, vd., 2015).

Özellikler-Kriterler	Önem Katsayısı
Kullanıcı Kimliği	14
Kullanım Amacı	13
Mekanın Fiziksel Özellikleri	12
Taşıyıcı Elemanlar	11
Tamamlayıcı Elemanlar	10
Uygun Malzeme Seçimi	9
Tekniğine Göre Uygulanma	8
Çevre ve Ekoloji	7

**Tablo 2.** Devamı (Continued)

Özellikler-Kriterler	Önem Katsayısı
Sismoloji	6
Mekanik Sistem	5
Tesisatlar	4
Tefrişat ve Düzenlenmesi	3
Aydınlatma	2
Aksesuarlar	1
<b>Kriter Sorularının Toplamı</b>	<b>105</b>

Her yapının konfor koşullarını sağlamak için, konumundan, işlevinden ve tasarımından kaynaklanan kendine özgü gereksinimleri söz konusudur. Bir yapı ya da hacimden kullanıcıların hoşnutluğu, insanı karşılıklı olarak etkileyen birçok etkene bağlıdır. Etkenlerin çokluğu sonuçların bir bütün olarak değerlendirmesini zorlaştırır. İnsanların biyolojik, psikolojik ve sosyokültürel ihtiyaçlarını karşılayabilmek için yarattıkları yapay çevrenin, bu ihtiyaçlara cevap verebilecek ısısal konfor şartlarına sahip olması gerekmektedir. Aksi takdirde mekan kullanıcılarının iş verimleri ve performansları düşeceği gibi, o mekanı kullanan tüm kişilerin sağlıkları da bozulacaktır.

Diğer taraftan, bilim ve teknolojideki hızlı gelişmeler, yeni yapı malzemelerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu gelişim bazı sorunları da beraberinde getirebilmektedir. Özellikle bina üretiminde yüksek enerji gerektiren yeni endüstriyel ürünlerin kullanılması söz konusudur. Bu ürünlerin önemli bir kısmıyla bina kullanıcıları sürekli temas ve etkileşim halindedir. Nitelsiz malzeme, yanlış malzeme, hatalı detay tasarımları ve uygulamalarından, kullanıcının sağlığı olumsuz yönde etkilenebilmektedir.

Küresel ısınma, hızla artan üretim, susuzluk, karbondioksit salınımının artması, çevre kirliliği ve doğal kaynakların hızla tüketilmesi yapı sektöründe çevre dostu, ekolojik binaların yapılmasını gündeme getirmiştir (Erdede ve Bektaş, 2014). İnsanların doğa ile uyum içerisinde, sağlıklı ve verimli bir hayat hakları vardır. Bu husus T.C. Anayasamızın 56. Maddesi ile de güvence altına alınmıştır (Ekinci, 2008).

Biyoharmolojik yani, kullanıcısıyla uyumlu, dengeli, konforlu, güvenli, sağlıklı, huzurlu ve fonksiyonel yapı tasarımında istenilen başarının elde edilebilmesi için aşağıda verilen hususlar ve bunların binadaki yansımaları göz ardı edilmemelidir. Bunlar;

- Yapı üretiminde kullanılan malzemelerin miktarca en aza indirilmesi,
- Malzeme veya yapının tekrar kullanılabilirliği,
- Değişen koşullara uygun olarak dönüştürülebilirliği,
- Hijyenik olması ve bakteri üretmemesi,
- İnsan ve diğer canlılar için güvenliliği,
- Enerji tasarrufu sağlayarak malzemenin veya yapının ısıtılmasında fosil kaynak gerekmemesi,
- Yerel veya bölgesel koşullara uyumluluğudur.

Sonuç olarak, biyoharmolojinin kuramsal esaslarına göre sağlıklı ve dengeli yapı tasarımı aşağıda verilen temel özelliklere göre gerçekleştirilmelidir.

- Ekolojik ve sismolojik olaylara karşı dayanım ve dayanıklılığı,
- Malzemenin reolojik, fiziksel ve eskimezlik özelliğini koruyabilmesi,
- Psikolojik ve sosyolojik ihtiyaçlara uygunluğu,
- Biyolojik ve fizyolojik ihtiyaçları karşılaması,
- Kullanıcının antropometrik özelliklere uygunluğu,
- Epidemiyolojik ve sanitasyon oluşumlarına karşı hassasiyeti,
- Değişen ihtiyaçlar durumunda işlevsellik ve fonksiyonelliğidir (Gifford, 1976; Ekinci, vd., 2009; Dikmen, vd., 2009; Ekinci ve Dikmen, 2009a; Ekinci ve Dikmen, 2009b; Ekinci, 2010; Ekinci ve Oymael, 2010; ÇEDBİK, 2017).

## 2. Çalışmanın Önemi (The Importance of Study)

Ülkemizde kamu hizmet binalarının mühendislik özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışma sayısı oldukça azdır. Mevcut çalışmaların çoğu reaktif özellikte olup özellikle deprem sonrası binada meydana gelen mühendislik özellikleri üzerinedir. Binaların proaktif bir yaklaşımla mühendislik özelliklerin ortaya konulduğu çalışma sayısının ise birkaç tane olduğu söylenebilir. Bu çalışmalar ise özellikle kamu binalarının faydalı mühendislik özellikleriyle doğrudan bağlantılı servis ömürlerinin, çevre ve tarafların görüş, inceleme ve

tartışmalar ile değerlendirilmesine yoğunlaşmıştır.

Bu makalede biyoharmolojinin kuramsal esasları ışığında geliştirilen BUD (Biyoharmolojik Uygunluk Değerlendirmesi) yöntemle bir kamu idari hizmet binasının mühendislik özellikleri incelenmiştir. Çalışma mevcut haliyle bu konuda yapılan öncü çalışmalardan olduğu söylenebilir. Bu çalışmada cevap aranılan problem cümlesi, incelenen kamu idari hizmet binasının BUD değeri ne kadardır? Bu probleme cevap bulmak için söz konusu kamu idari hizmet binasının, BUD incelenmesi ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Bir binanın BUD incelenmesi, beş temel aşamadan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla,

- Ön Teknik İnceleme (ÖTİ);
- Planlama, Projelendirme ve Uygulama (PPU: Mühendislik Özellikleri),
- Mekansal Niteliklerin Yansıma Düzeyi (MNYD: Mimari Özellikleri),
- Yaşam Alanı Biyoharmolojik Uygunluk Değerlendirmesi (YABUD: Yapı Biyolojisi-Yapı Fiziki Özellikleri) ve
- Kullanıcı Memnuniyeti (KM)'dir.

Bu çalışmada sadece binanın mühendislik özellikleri incelenmesi ile sınırlı tutulmuştur. Son iki aşama olan YABUD ve KM ise, ilk üç aşama bulguları ışığında ve ihtiyaç durumunda yapı fiziki ve biyolojisi şartları kapsamındaki yaşam kalitesini ve canlı sağlığını olumsuz yönde etkileyen ortam parametrelerinin incelendiği aşamadır. YABUD ve KM'de kullanıcı kimliği ve kullanım amacına göre kapsam ve yöntem de bazı değişiklikler söz konusu olabilmektedir.

Bu çalışmada açıklanan BUD sistemi, uygulama esasları ve sonuçları bir binanın nihai özelliği hakkında çok önemli bilgilere ulaşmamıza imkan vermektedir. BUD sistemi, kamu yapılarının yanı sıra konut, sağlık, spor, ticaret ve hayvancılık gibi diğer binalara da çok kolay uygulanabilecek niteliktedir. Ayrıca BUD sisteminin, özellikle yerel yönetimlerin çarpık yapılaşma ve kentleşme çalışmalarında da kullanılabilir nitelikte olduğu söylenebilir.

Bu çalışma, binaların mühendislik özelliklerini, farklı bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır. Kamusal, idari hizmet kullanım amaçlı bir binanın mühendislik özellikleri için farklı yöntemler ileri sürülebilir ve bunlarla binalar hakkında bilgi sahibi olunabilir. Ayrıca binanın özellikle "Kullanıcı Kimliği" ve "Kullanım Amacı" ekseninde uygunluğu ve mevcut durumunu ortaya koyma açısından sektörün önemli bir eksikliğini giderebilir. Bu açıdan, benzer konularda yapılacak çalışmalara ışık tutabilecek ve/veya rehber olabilecek niteliktedir.

### 3. Yöntem (Method)

Bu çalışmada BUD sistemi esas alınarak "Kullanıcı Kimliği" ve "Kullanım Amacına" göre binanın mevcut durumu inceleme yöntemi kullanılmıştır. BUD kapsamında incelenen bina 2017 yılında hizmete alınmıştır (Şekil 1.a. ve Şekil 1.b.). Binanın emsal alanı 158.78m<sup>2</sup>, toplam alanı 931.32m<sup>2</sup> ve önem katsayısı (I)=1.5, Rx=6.6, Ry=6.8 ve zemin yatak katsayısı K=2100'dür. Bina üzerinde inceleme ve gözlemler için Mart 2018 ayı için yazılı inceleme izni alınmıştır.

Bina betonarme perde çerçevesi yapı sistemli olup, iki ana bloktan oluşmaktadır. Bloklar B+Z+3 şeklinde olup (Şekil 1.a. ve Şekil 1.b.) ikinci blok sosyal hizmet amaçlı kullanılmaktadır.

Çalışmada, Tablo 2'de verilen BUD'un kuramsal esaslarında yer alan 14 mühendislik kriterleri ışığında binaya 560 sorgulama sorusu (Şekil 1.a., Şekil 1.b., Tablo 3) sorulmuş ve bu sorgulama soruları karşısında binada var olan mevcut durum teknik gözlem neticesinde kayıt altına alınmıştır.

Tablo 2'de verilen her bir özellik-kriter sorularına karşılık olarak "Uygun-Yeterli (+)", "Uygun Değil-Yetersiz (-)" veya "İncelenmedi-Veri Yok (±)" şeklinde cevaplar toplanmıştır. Her bir özellik-kriter için "Uygun-Yeterli (+)" şeklindeki cevaplar toplanır ve kriterin Değerlendirme Puanı (DP) hesaplanmıştır.

$$DP = \left( \frac{9}{\text{Kriter Soru Sayısı}} \right) \times \text{"Uygun - Yeterli (+)"} \quad (1)$$

formülüyle hesaplanır.

Bulunan sayısal değer Tablo 5'deki kısma yazılır. Bu yaklaşımla diğer kriterlerin DP puanları hesaplanır ve ilgili alanlara yazılır. Daha sonra binanın PPU (Planlama Projelendirme ve Uygulama) aşaması BUD değerlerinin hesaplanmasına geçilmiştir.

$$BUD = \left( \frac{100}{105} \right) \times \text{ÖK} \times \text{YP} \times \text{DP} \quad (2)$$

formülüyle hesaplanmıştır. Burada;

105= PPU Önem Katsayıları Toplamı

ÖK= Önem Katsayısı (İncelenen kritere göre, →Tablo 2'den)

YP= Yıpranma Performansı (Binanın yaşına göre, →Şekil 2'den)

DP= Değerlendirme Puanı'dır.

Herhangi bir binanın PPU kapsamındaki "Kullanıcı Kimliği" ve "Kullanım Amacı" kriterine ilişkin BUD hesaplaması şöyle yapılmıştır. Örneğin;

Kullanıcı Kimliği Kriteri:

YP= Bina Yaşı= 0.98 (Şekil 2'den, Yeni ve 1 yaşında)

ÖK= Kullanıcı Kimliği = 14 (Tablo 1'den)

DP= Değerlendirme Puanı= 45 sorundan 26 husus "Uygun-Yeterli (+)"

$$DP = \left(\frac{9}{45}\right) \times 26 = 5.20 \quad (3)$$

$$BUD = \left(\frac{100}{105}\right) \times 14 \times 0.98 \times 5.20 = 67.95 \quad (4)$$

Bu şekilde mühendislik özellikleri-kriterleri kapsamındaki diğer 14 kriterin BUD değerleri de aynı şekilde hesaplanmıştır. Böylece 14 kriterin BUD değerleri toplanarak binanın mühendislik özellikleri konusundaki "Genel Puanı" bulunur ve Tablo 5 oluşturulur. Elde edilen "Genel Puan" Tablo 4 verileriyle karşılaştırılarak incelenen yapının sertifika sınıfı ve sembolü belirlenir.

Daha sonra yapının Kriter Eksiklik Yüzdesi (KEY)'nin hesaplanmasına geçilir. Bu hesaplamada amaç, yapının mühendislik özelliklerinde öne çıkan eksiklikleri belirlemek ve yüzdesini hesaplamaktır. İnceleme sonucunda elde edilen "Tespit Edilen Eksiklik Sorgu Sayısı" ve "İncelenemeyen Sorgu Sayısı" verileri Tablo 6'deki ilgili satır ve sütunlara yazılır ve hesaplaması yapılır.

Örnek PPU eksiklik-yetersizlik genel değerlendirmesi Tablo 6'de verilmiştir. Tablo 6'deki Kriter Eksiklik Yüzdesi (KEY) şöyle hesaplanır.

$$KEY = \frac{\text{Tespit Edilen Eksiklik Sorgu Sayısı}}{(\text{STSS}-\text{İSS})} \times 100 \quad (5)$$

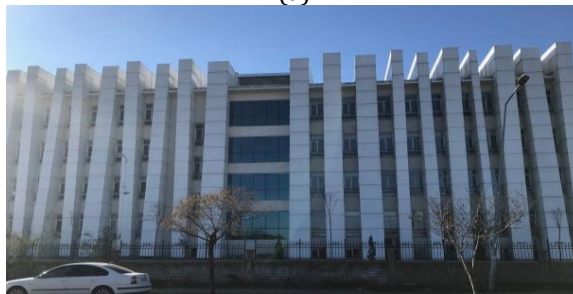
STSS= Sorgulanan Toplam Sorgu Sayısı,

İSS= İncelenmeyen Sorgu Sayısı'dır.

Kullanıcı kimliği ve kullanım amacına uygun yapılarda eksiklik-yetersizlik ortalaması en fazla %25 olmalıdır. Elde edilen sayısal veriler Tablo 4 verilerine göre kıyaslanarak binanın mevcut durumu hakkında bir nihai sonuç elde edilir (Ekinci ve Elyiğit, 2017).



(a)

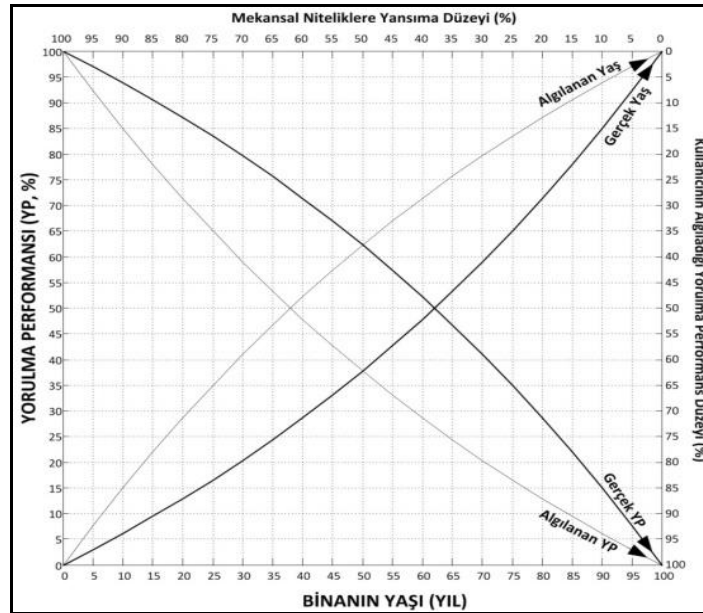


(b)

Şekil 1. Binanın genel görünümü (General view of the building)

**Tablo 3.** Mühendislik özelliklerinin kriterlerinin içeriği (Content of the criteria of engineering properties) (Ekinci ve Baykuş, 2015a; Ekinci ve Baykuş, 2015b; Ekinci ve Elyiğit, 2017).

Özellikler-Kriterler	Soru Sayısı	İçerik Açıklaması
Kullanıcı Kimliği	45	Kim, Yaş, Engelli, Eğitim, Cinsiyet, ...
Kullanım Amacı	52	Konut, Hastane, Okul, Ofis, Sera, Besicilik, AVM, ...
Mekanın Fiziksel Özellikleri	43	Alanı, Hacmi, Derinliği, Yönü, ...
Taşıyıcı Elemanlar	60	Temel, Kolon, Perde, Kiriş, Döşeme, ...
Tamamlayıcı Elemanlar	57	Duvar, Pencere, Merdiven, Tavan, Taban, ...
Uygun Malzeme Seçimi	44	Kağır, Ahşap, Kompozit, Boya, ...
Tekniğine Göre Uygulanma	38	Standart, Detay, Nitelikli İşçilik Kullanımı, ...
Çevre ve Ekoloji	56	Peyzaj, Arazi ve Zemin Yapısı, Isı, Yağmur, Rüzgar, ...
Sismoloji	35	Deprem, Statik, Gerilme, Yapının Deprem Davranışı, ...
Mekanik Sistem	34	Asansör, Isıtma, Havalandırma, Alternatif Enerji Kul., ...
Tesisatlar	44	Atık Yönetimi, Su Verimliliği, Elektrik, Su, Doğalgaz, ...
Tefrişat ve Düzenlenmesi	17	Ankastre Elemanlar, Temel Mobilya ve Donanımları, ...
Aydınlatma	18	Doğal, Direkt, Efektler, ...
Aksesuarlar	17	Musluk, Prizler, Kapı-Pencere Kolları, ...
<b>Kriter Sorularının Toplamı</b>	<b>560</b>	

**Şekil 2.** BUDBOX grafiği (Binanın yaş ve yorulma performansına göre) (BUDBOX graphic (According to the building's age and fatigue performance)) (Ekinci, 2011).

**Tablo 4.** BUD sertifika puan tablosu (BUD certificate score table) (Ekinci, 2011).

Sertifika Puanı		Sembol	Sertifika Sınıfı	Açıklama
751-900		A+++	Altın	"Altın" Sertifikalı Biyoharmolojik Bina
601-750		A++	Gümüş	"Gümüş" Sertifikalı Biyoharmolojik Bina
451-600		A+	Bronz	"Bronz" Sertifikalı Biyoharmolojik Bina
301-450	376-450	A-	İyileştirilmeli	Minör Değişikliklere İhtiyacı Olan Bina
	301-375	A-		Majör Değişikliklere İhtiyacı Olan Bina
000-300		A--	Uygun Değil	

#### 4. Bulgular (Findings)

Yapılan inceleme sonucunda elde edilen veriler yöntem bölümünde kısaca açıklanan yöntem kullanılarak ortaya çıkan sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir. İnceleme sırasında belirlenen eksiklik ve yetersizlikler ise yine yöntem bölümünde açıklanan hesaplama neticesinde ulaşılan sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir. Ayrıca binada tespit edilen BUD sistemi açısından önemli eksiklik-yetersizliklere ilişkin bulgulardan 100 adet temel eksiklik Tablo 6'da verilmiştir.

Aşağıda alfabetik olarak verilen 100 adet eksiklik ve yetersizliklerin bazıları kısa vadede çözülebilir niteliktedir. Bazılarının çözümü ise çok yüksek yatırım maliyetini gerektirecek niteliktedir.

**Tablo 5.** Binanın mühendislik özellikleri inceleme sonuçları (Engineering properties of the building results)

İncelenen Özellikler-Kriterler	ÖK	YP (%)	Değerlendirme Puanı (DP)									DP Sonuç	
			Zayıf			Orta			İyi				
			1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Kullanıcı Kimliği	14	0.98					5.20						67.85
Kullanım Amacı	13	0.98			3.81								46.20
Mekanın Fiziksel Özell.	12	0.98			3.55								42.20
Taşıyıcı Elemanlar	11	0.98					5.70						58.52
Tamamlayıcı Elemanlar	10	0.98				4.58							42.74
Uygun Malz. Seçilmesi	9	0.98					5.32						44.67
Tekniğin Göre Uygulama	8	0.98			3.55								26.53
Çevre ve Ekoloji	7	0.98					4.34						28.35
Sismoloji	6	0.98							6.17				34.56
Mekanik Sistem	5	0.98	1.85										8.65
Tesisatlar	4	0.98			3.89								14.51
Tefrişat ve Düzenlemesi	3	0.98		2.65									7.41
Aydınlatma	2	0.98			3.50								6.53
Aksesuarlar	1	0.98					5.29						4.94
Toplam	105		Değerlendirme Puanı Toplamı									433.75	
BUD Sertifika Sembolü	A-												
BUD Sertifika Sınıfı	İYİLEŞTİRİLMELİ-Minör Değişikliklere İhtiyacı Olan Bina												

**Tablo 6.** Binanın eksiklik-yetersizlik açısından genel değerlendirilmesi (General evaluation of the building in terms of deficiency and inadequacy)

İncelenen Özellikler-Kriterler	Sorgulama Sorusu	İSS İncelenemeyen Sorgu Sayısı	Tespit Edilen Eksiklik Sorgu Sayısı	KEY Kriter Eksiklik Yüzdesi ~(%)	Eksiklik-Yetersizlik Yüzdesi Sıralaması
Kullanıcı Kimliği	45	10	9	25.71	12
Kullanım Amacı	52	3	27	55.10	4
Mekanın Fiziksel Özellikleri	43	9	16	47.04	5
Taşıyıcı Elemanlar	60	16	6	13.63	14
Tamamlayıcı Elemanlar	57	8	20	40.81	9
Uygun Malzeme Seçimi	44	7	11	29.72	11

**Tablo 6.** Devamı (Continued)

İncelenen Özellikler-Kriterler	Sorgulama Sorusu	İSS İncelenemeyen Soru Sayısı	Tespit Edilen Eksiklik Soru Sayısı	KEY Kriter Eksiklik Yüzdesi ~(%)	Eksiklik-Yetersizlik Yüzdesi Sıralaması
Tekniğine Göre Uygulanma	38	11	12	44.44	7
Çevre ve Ekoloji	56	7	22	44.89	6
Sismoloji	35	6	5	17.24	13
Mekanik Sistem	34	11	16	69.56	1
Tesisatlar	44	10	15	44.11	8
Tefrişat ve Düzenlenmesi	17	5	7	58.33	2
Aydınlatma	18	2	9	56.25	3
Aksesuarlar	17	1	6	37.50	10
Toplam	560	106	181		
Eksiklik-Yetersizlik Ortalaması (KEY) = $(\frac{181}{560}) \times 100$					32.32

**Tablo 7.** Binada tespit edilen bazı temel eksiklik-yetersizlikler (Some basic deficiencies-deficiencies detected in the building)

NO	Eksiklik-Yetersizlik Açıklaması
1	Acil durum bina kullanım planı ve acil durum bina tahliye planı yok.
2	Ahşap malzeme kullanım oranı yüksek tutulmamış.
3	Aksesuar malzemelerinde bir bütünlük sağlanmamış.
4	Aksesuarların (dolap, raf, vb.) duvarlara sabitletilmesi ve/veya ankrajlanması uygun değil.
5	Asansör alanı bina taşıyıcı sistemle ilişkilendirilmemiş.
6	Asansör donanımları engelli kullanımına uygun değil.
7	Asansörün motor ve sistemin genel çalışma sesi bina iç hacimlerinden duyuluyor.
8	Ateş ve duman bacaları tekniğine göre uygulanmamış.
9	Aydınlatma sistemi açma-kapama elemanları engelli kullanımına uygun değil.
10	Ayna gibi elemanlar tekniğine göre montajı yapılmamış.
11	Bakım-onarım için teknik eleman yok.
12	Basamak kaygan olmayan bir malzemeyle kaplanmış veya kaymayı engelleyen bant çekilmemiş.
13	Bina alternatif enerji kaynağı kullanılmıyor.
14	Bina ana giriş kapısı dışa doğru açılmıyor ve tek kanatlı değil.
15	Bina ana giriş kapısı en az 120cm'den küçük ve bariyerli değil.
16	Bina bileşenlerine (yapısal elemanlar, mekanik, elektrik ve su tesisatları, pencere, çatı elemanları vb.) yönelik bakım, onarım ve yenileme faaliyetlerinin zaman programının ve maliyet etkilerinin planlanması yapılmamış.
17	Bina bodrum katında yapı fiziği ve yapı biyolojisi açısından sorunları var.
18	Bina elektrik tesisatı yıllık bakım ve kontrol belgeleri yok.
19	Bina içerisinde sürekli kullanılacak yaşam alanları, güneş ısı ve ışığı ile doğal havalandırmadan en uygun derecede faydalanacak şekilde yerleştirilmemiş.
20	Bina içinde yeterli uyarı ve/veya ikaz levhaları yok.
21	Bina kabuğunda ve/veya pencereler üzerinde tekniğine uygun sabit gölgelik gibi (örneğin; niş, söve, vb.) yapı elemanları yok.
22	Bina kabuk elemanları derece-gün bölgesi kriterlerine uygun değil.
23	Bina kabuk elemanları her cephede aynı kalınlıkta değil.
24	Bina kabuk elemanlarındaki malzeme derece-gün ve mekan kullanım amacına uygun seçilmemiş.
25	Bina mevcut çevrede ilave trafik etkisi oluşturmuş.
26	Bina sokak ve/veya cadde bağlantıları engelli kullanımını dikkate alınmamış.
27	Bina tamamı nefes alan kabuk ve kaplama malzemeleriyle kaplanmamış.
28	Bina, bahçe giriş-çıkış kapıları güvenlik görevlisi yok.
29	Binada kullanılan elektrikli/elektronik aletlerin yıllık bakım ve kontrol belgeleri yok.
30	Binada mekanik havalandırma sistemi yok.
31	Binada mevzuata uygun yangın yalıtımı yapılmamış.
32	Binada özel engelli asansörü ve peyzaj çalışması yok.
33	Binaların mimari tasarımında, imar ve ada/parsel durumu dikkate alınarak ısıtma, soğutma, doğal havalandırma, aydınlatma ihtiyacı asgari seviyede tutulmamış.
34	Binanın bulunduğu parsel çevresindeki cadde ve sokaklardaki kaldırımlar engelli kullanımına uygun değil.
35	Binanın dış görünümünde yerel ve/veya bölgesel kültürel doku ve değerler yansıtılmamış.
36	Binanın her katı için yerleşim planı, katın görünen yerine asılmamış.
37	Binanın nitelikli çevre drenaj sistemi yok.
38	Binanın özellikle güney cephe pencereleri üzerinde güneş kırıcı ve stor gibi elemanlar yok.
39	Binanın yapılacağı yere ilişkin olarak yenilenebilir enerji kaynak kullanım imkânları araştırılmamış.
40	Binaya 200m mesafeden daha yakın mesafede yüksek gerilim hattı var.
41	Bodrum veya zemin katta su mekanik tahliye sistemi yeterli değil.
42	Cephe kaplama elemanların uygulama-bitim detaylarında sorunlar oluşmuş.
43	Cephede gereksiz fazla abartılmış cephe kaplaması, pencere elemanı gibi unsurlar var.



Tablo 7. Devamı (Continued)

NO	Eksiklik-Yetersizlik Açıklaması
44	Çarpmaya dayanıksız duvarlarda koruma bantları yok.
45	Çatı arası hacimde gün ışığı sızıntıları var.
46	Denizlik ve parapetler tekniğine göre uygulanmamış
47	Denizlik ve parapetlerde eğim (dever %5-7) ve damlalık uygulamaları yok.
48	Dış kabuk elemanları TS825 esaslarını sağlamıyor.
49	Duvar en dış kaplama elemanı derece-gün bölgesine uygun değil.
50	El yıkama ve genel temizlik elemanlarının boyutsal özellikleri yeterli mi?
51	Elektrik enerjisi için fotovoltaik panelleri 7/24 saat kullanılacak özellik ve nitelikte değil.
52	Elektrik enerjisi için fotovoltaik panelleri yok.
53	Elektrik ve/veya haberleşme için tesisat bacası tekniğine göre düzenlenmemiş.
54	Enerji izleme ve dağıtım sistemi yok.
55	Enerji kimlik belgesi yok.
56	Fan-coil cihazlarındaki yoğunlaşma ile ortaya çıkan suları tekrar kullanılacak sistem oluşturulmamış.
57	Geri dönüşümü sağlanan katı atıkların ayrı ayrı toplandığı kutular yok.
58	Gri suların arıtdıldıktan sonra tekrar kullanımı sağlayan sistemler yapılmamış.
59	Güneş, nem ve rüzgar etkisi de dikkate alınarak, doğal ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma imkanlarından azami derecede yararlanılmamış.
60	Hareketli elemanlarda detay çözümleri doğru değil.
61	Isı geri kazanım sistemi ve klima santrali yok.
62	Islak mekan duvarlarında yapı fiziği sorunları var.
63	Islak mekan kullanıcıların temizlik malzemesi ve kurulanma elemanları yok.
64	Islak mekanlarda döşeme süzgeç elemanları tekniğine göre uygulanmamış.
65	Islak mekanlardaki tezgahlar tekniğine uygun yerleştirilmiş ve/veya montajı yapılmamış.
66	İklimlendirme sistemlerinde oda sıcaklığı ayar düzenekleri kullanılmamış.
67	İstenmeyen ısı kazanç ve kayıpları asgari düzeyde tutulmamış.
68	Kalorifer kazan ve tesisatının yıllık bakım kontrol belgesi yok.
69	Kapılarda tekmelik yok.
70	Kolon yüksekliğinin iki katından daha fazla giriş serbest açıklık uygulaması var.
71	Koridorlarda, merdivenlerde ve bodrumda LED Işıklandırma yok.
72	Korumalı katı atık deposu yok.
73	Küpeşte ve korkuluk tekniğine göre uygulanmamış.
74	Lavabolarda kullanılan suyun katı atık filtrasyonundan sonra tuvalet ve sulama gibi amaçlarla tekrar kullanılmasına yönelik çözümlerde hatalar var.
75	Mahal bazında değişken hava debisi kontrolü yapılan iklimlendirme sistemlerinde, sisteme bağlı fanların değişken debili düzenekler kullanılmamış.
76	Merdiven kovası ve limonluk uygulamaları tekniğine uygun değil.
77	Merdivenin her iki yanında tutunma, tırabzan ve küpeştesi yok.
78	Merkezi ısıtma sistemi olan mekanda özel yangın yalıtımı önlemleri alınmamış.
79	Musluk ve diğer bataryalar sıcak ve soğuk su kullanımına uygun değil.
80	Özel atık yönetimi ve/veya sistemi yok.
81	Özel katı atık ve/veya çöp toplama sistemi yok.
82	Pencerelerde kirli ve temiz hava giriş ve tahliye menfezleri yok.
83	Pencerelerin bazılarında TS825 esaslarına uygun olmayan çözümler var.
84	Planda merdiven ve asansör boşlukları 1/3'den fazla yapılmış.
85	Sıcak su güneş kolektörleri 7/24 saat kullanılacak özellik ve nitelikte değil.
86	Soğutma kulesi ve sıcak su güneş kolektörleri yok.
87	Sığınak her an kullanılabilir durumda değil.
88	Sığınaktaki tefrişat ve düzenlemeler ilk yardım, koruma veya müdahaleye uygun değil.
89	Sivil savunma dosyası yok.
90	Tavanda kireç badana uygulaması yok.
91	Temel ilk yardım malzemeleri yok.
92	Temiz su kullanımını azaltan sistemler yapılmamış.
93	Tezgah üstü ankastre elemanlar ve/veya demontabil ankastre elemanları tekniğine uygun yerleştirilmemiş ve/veya montajı yapılmamış.
94	Yağmur suyunu biriktirme ve kullanma sistemleri yapılmamış.
95	Yağmur suyunun toplanarak tekrar kullanılmasını sağlayan sistemler kurulmamış.
96	Yangın talimatnamesine uygun yangın teçhizatı (yangın tüpü-tarihi geçmiş)yok.
97	Yapı arsası ve/veya parseli içinde çocuk oyun alanı ve yürüyüş yerleri yok.
98	Yapıda hareket ve titreşim derzleri yok.
99	Yıllık baca temizliği yapılmamış.
100	Yönetici odalarında uygun ses yalıtımı yapılmamış.

#### 4. Sonuç ve Öneriler (Conclusions and Recommendations)

Ülkemizde kamu binalarının önemli bir kısmı tip proje uygulaması ve en düşük maliyete göre yaptırılması söz konusudur. Bu nedenle binaların kullanıcı kimliği ve kullanım amacı bakımından bazı eksikliklerin olması kaçınılmazdır. Yeni tamamlanan ve hizmete alınan kamu idari hizmet binasının (Şekil 1.a. ve Şekil 1.b.) mevcut mühendislik özelliklerinde önemli eksiklik ve yetersizliklerin olduğu Tablo 7'den de ortaya konulmuştur. Bu eksikliklerin önemli bir kısmının proje aşamasında da dikkate alınmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca bina tasarımı, projelendirilmesi ve uygulama sürecinde kullanıcıların görüş, istek, beklenti ve ihtiyaçlarının da dikkate alınmadığı anlaşılmaktadır.

Tablo 5'den de görüleceği üzere binanın BUD puanı ~434'dür. Bu puan Tablo 4 verileriyle karşılaştırıldığında binanın "İYİLEŞTİRİLMELİ: Minör Değişikliklere İhtiyacı Olan Bina" olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, Tablo 6'de görüleceği üzere binanın eksiklik-yetersizlik yüzdesi 32'dir. Biyoharmolojik bir binada bu değer %25'den daha fazla olmaması istenir. Bu değer altındaki kriterlerde belirlenen eksiklik-yetersizlikler kullanıcı kimliği ve kullanım amacı bakımından binanın genel niteliğinde ciddi sorunlara neden olması beklenmemektedir.

Tablo 7'de verilen eksiklik-yetersizlik hususlarında yeni düzenleme, tadilat ve iyileştirme çalışmalarındaki ana hususlardır. Binada genel bir iyileştirmenin yapılması istemi durumunda ise Tablo 6'da verilen "Eksiklik-Yetersizlik Yüzdesi Sıralamasına göre yapılması önerilir. Yani yeniden düzenleme, tadilat ve iyileştirmede ilk üç önceliğin Mekanik Sistem, Tefrişat ve Düzenleme, Aydınlatma şeklinde olması önerilir.

Kamu idari hizmet binasının en geç 5 yıl içerisinde, yeni bir BUD çalışmasının yapılması ve durumunun tekrar ortaya konulması önerilir. Ayrıca binanın mimari özelliklerinin (MNYD: Mekansal Niteliklerin Yansıma Düzeyi) yanı sıra YABUD (Yaşam Alanı Biyoharmolojik Uygunluk Değerleri) özelliklerinin de incelenmesi kullanıcı kimliği ve kullanım açısından yararlı olacaktır.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar, bu çalışmaya destek veren Nadir ÇAKILCIOĞLU'na, Elvan ECE'ye ve Rabia SUNAY'a, Bingöl Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğüne, Mimar Büşra KILIÇ'a, teşekkürlerini sunarlar.

#### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

#### Kaynaklar (References)

- Akgül, M. ve Ekinci, C.E., 2016. Yapılarda Huzur Kriterlerinin İncelenmesi Elazığ Örnekleme. International Science Symposium, Bildiriler Kitabı, September 01-04, 2016. Büyükkada-İstanbul.
- Akman, A., 1999. Ekolojik ve Biyolojik Yapı Uygulamaları, Yapı 213, 1999/8, Ss:91-102.
- Akman, A., 2005. İnsan Sağlığı, Sağlıklı Yapı ve Yapı Biyolojisi, Mimarlık Kültür Sanat, Yapı Dergisi, Sayı:279, Şubat.
- Aksoy, U.T., Ekinci, C.E. ve Gürol, M., 2015. The Bioharmological Investigation of Spatial Features an Educational Building. Global on Humanities and Social Sciences. Vol.:1, 21-29.
- Ay, S. ve Ekinci, C.E., 2016. Evaluation of Thermal Comfort Conditions in Terms of Educational Environment and Users. ICNASE'16. International Conference on Natural Science and Engineering, Bildiriler Kitabı, March 19-20, 2016. Kilis.
- Ay, S., Baykuş, N. ve Ekinci, C.E., 2016. Elazığ ve Malatya'da Bazı İlköğretim Binalarının Isıl Konfor ve Koruma Değerlendirmesi. KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt:19, Sayı:2, Ss:84-92.
- Bal, S., Baykuş, N. ve Ekinci, C.E., 2014. Eğitim Ortamlarının Isıl Konfor Şartlarının İncelenmesi. Eğitim ve Öğretim Araştırmaları Dergisi (JRET). Cilt:4, Sayı: 2, Makale No:20, Ss:200-209.
- ÇEDBİK, 2017. ÇEDBİK-Konut Sertifikası. <http://www.cedbik.org> (Erişim Tarihi:29.04.2017.)
- Dikmen, M., Şepitci, T. ve Ekinci, C.E., 2009. Sağlıklı Konut Üretiminde Biyoharmoloji Gerçeği. E-Journal of New World Sciences Academy. Volume: 4, Number: 1, Article Number: E0001, Ss:1-13.
- Ekinci, C.E., 2006. Biyoharmoloji. E-Journal of New World Sciences Academy. 1(2), 32-49. ISSN:1306-3111.
- Ekinci, C.E., 2007. Biyoharmoloji. Ankara: Data Yayınları. ISBN:978-975-6305-22-5.
- Ekinci, C.E., 2008. Yapıda Yaşam Kalitesinin Artırılması ve İyileştirilmesinde Yeni Bir Bilim: Biyoharmoloji. 14. Ulusal Ergonomi Kongresi, 30 Ekim-1 Kasım 2008, KTÜ, Trabzon.
- Ekinci, C.E. ve Dikmen, M., 2009a, Ekim. Eğitim Yapılarının Biyoharmoloji Kuramsal Esaslarına Göre İncelenmesi. Uluslararası 5. Balkan Eğitim ve Bilim Kongresi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Ekinci, C.E. ve Dikmen, M., 2009b, Haziran. Yapılarda Konfor Şartları ve Huzur Kriterlerinin Biyoharmoloji Kuramsal Esaslarına Göre Belirlenmesinin Önemi. 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, ULIBTK'09, Cumhuriyet Üni., Sivas.
- Ekinci, C.E., Dikmen, M. ve Oymael, S., 2009. Eğitim Binalarında Isıl Konfor Şartlarının İncelenmesinde Bir Örneklem 15. Ergonomi Kongresi. Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Ekinci, C.E. ve Oymael, S., 2010, May. Review of the Biyoharmological Properties of Building and Construction Materials from

- the Sustainability Point of View. International Sustainable Buildings Symposium (ISBS), Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Ekinci, C.E., 2010, May. Balance and Harmony Sciences in Building Design: Bioharmology. International Sustainable Buildings Symposium (ISBS), Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Ekinci, C.E., 2011a. Biyoharmolojik Yapılar. Yapı Dergisi, 358 Ss:128-132.
- Ekinci, C.E., 2011b. Yaşam Alanlarının Biyoharmolojik Uygunluk Değerlerinin Belirlenmesi ve Standardizasyonu, TSE Standard: Ekonomik ve Teknik Dergi, 50(591), 92-106.
- Ekinci, C.E., 2011c. Biyoharmoloji: Genel Bir Bakış. [www.tavsiyeeidiyorum.com](http://www.tavsiyeeidiyorum.com).
- Ekinci, C.E., 2011d. Eğitim Yapılarının Biyoharmolojik Uygunluk Değerlendirmesi Üzerine Bir İnceleme: Fırat Üniversitesi Örnekleme. Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(1),7-20.
- Ekinci, C.E. ve Elyiğit, B., 2012. Kullanıcısıyla Uyumlu ve Dengeli Yapı Tasarımı ve Üretimi Sürecinde Biyoharmoloji Biliminin Önemi. 5. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu. Çankaya Üniversitesi, Ankara.
- Ekinci, C.E., 2012a. Kullanıcısıyla Uyumlu ve Dengeli Yapı Tasarımı ve Üretim Sürecinde Biyoharmolojini Biliminin Önemi. V. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu. Bildiriler Kitabı, 26-27 Nisan 2012, Ankara: Çankaya Üniversitesi.
- Ekinci, C.E., 2012b. Sürdürülebilir Yapı Tasarımında Biyoharmoloji Biliminin Yeri ve Önemi. Sürdürülebilir Yapı Tasarımı Ulusal Konferansı, Bildiriler Kitabı, 12-13 Kasım 2012, İzmir, Yaşar Üniversitesi.
- Ekinci, C.E. ve Elyiğit, B., 2012. Kullanıcısıyla Uyumlu ve Dengeli Bina Tasarım ve Üretiminde Biyoharmolojinin Önemi. Eğitim Odağında Artvin Sempozyumu. Artvin Çoruh Üniversitesi, Bildiriler Kitabı-II. Artvin.
- Ekinci, C.E., 2014. A New System Proposal about Certification of Engineering Properties of Building. International Journal of Structural Analysis and Design-IJSAD, Vol.:1, Issue:3, pg:162-166.
- Ekinci, C.E., Keleşoğlu, Ö. ve Gürol, M., 2014. The Bioharmologic Investigation of an Educational Building according to the Criteria of Planning Project Design and Application. 3rd World Conference on Design, Arts and Education. May 02-03,2014, Dubrovnik, Croatia.
- Ekinci, C.E. ve Baykuş, N., 2015a. An Experimental Analysis of the Bioharmological Properties of Polyclinics at Hospitals in August. Environment and Ecology Research 3 (6):150-157.
- Ekinci, C.E. ve Baykuş, N., 2015b. An Experimental Analysis of the Bioharmological Properties of Polyclinics at Hospitals in December. 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science. ISITES2015, 3-5 June 2015, Valencia-Spain.
- Ekinci, C.E. ve Elyiğit, B., 2017. Bir Yükseköğretim Binasının Mühendislik Özelliklerinin BUD Kapsamında İncelenmesi. ISS2017 Bilim Sempozyumu. Bildiri Özetleri Kitabı. 04-08 Eylül 2017, Tiflis-Gürcistan.
- Erdede, S.B. ve Bektaş, S., 2014. Ekolojik Açıdan Sürdürülebilir Taşınmaz Geliştirme ve Yeşil Bina Sertifika Sistemler. Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi. 6 (1)1-12.
- Erten, D., 2009. İklim Değişikliği ve Çevre Dostu Yeşil Binalar. [http://www.istanbulenerji.com.tr/LogoEast/dosya/video/dokumanlar\\_620\\_8-%20Duygu%20ERTEN\\_Sunum.pdf](http://www.istanbulenerji.com.tr/LogoEast/dosya/video/dokumanlar_620_8-%20Duygu%20ERTEN_Sunum.pdf).
- Kıncay, O., 2012. Sürdürülebilir Yeşil Binalar, [www.yildiz.edu.tr/~okincay/dersnotu/Yesil-I.Bol.pdf](http://www.yildiz.edu.tr/~okincay/dersnotu/Yesil-I.Bol.pdf), (Erişim Tarihi 13.08.2012.)
- MEGM, 2018. Taşınmaz Cins Dağılımı. <http://kurumsal.milliemlak.gov.tr/Sayfalar/kurumsal-bilgiler/istatistiksel-bilgiler/tasinmaz-cins-dagilimi1.aspx>. (Erişim Tarihi: 30 Mart 2018.)
- Özyer, N.S., 2018. Gölgeleme Elemanlarının Bina Enerji Harcamalarına ve Kullanıcı Konforuna Etkisinin Değerlendirilmesi: Üniversite Kampüsünde Bir Ofis Binası Örneği. Yeşil Bina: Sürdürülebilir Yapı Teknolojileri Dergisi, 9(47) 26-35, ISBN:1309 6540.
- Porgalı, M.S., 2015. Kamu İdari Hizmet Binası Projelerine Yönelik Yaklaşım ve Süreç Önerisi, (Uzmanlık Tezi). Ankara: İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, ISBN: 978-605-9041-51-5.



## SICAKLIK KONTROLLÜ MİKRODALGA KURUTUCU GELİŞTİRİLMESİ VE PORTAKAL KURUTMA PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Hakan POLATCI\*, Muhammed TAŞOVA

Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Tokat, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Sıcaklık Kontrolü,  
Mikrodalga Kurutucu,  
Portakal.*

### Öz

Ülkemizde portakal üretimi yılda ortalama iki milyon ton ile turuncu meyveleri içerisinde birinci sırada yer alırken daha çok yaş ve meyve suyu olarak tüketilmektedir. Bu çalışmada imal edilen sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu ile 55 ( $\pm 2$ ), 65 ( $\pm 3$ ) ve 75 ( $\pm 4$ ) °C kurutma sıcaklıklarında kurutulan portakal dilimlerinin kuruma performans değerleri, en uygun ince tabakalı kuruma modeli ve kalite değeri açısından en uygun renk değerleri belirlenmiştir. Kurutma işlemleri ürün nemi yaş baza göre % 10-13 seviyelerine düşene kadar kurutulmuştur. 55, 65 ve 75 °C kurutma sıcaklıklarında belirlenen ortalama kuruma süreleri sırasıyla; 390, 150 ve 65 dakika olarak belirlenmiştir. Üründen birim zamanda uzaklaşan nem oranları ince tabakalı kurutma modellerinde işlenerek kuruma eğrilerini en iyi tahmin eden matematiksel model belirlenmiştir. Eğriler oluşturulurken literatürde en yaygın olarak kullanılan Page, Midilli-küçük, Yağcıoğlu ve Jane-Das modelleri seçilmiştir. Kullanılan tüm modellerin kabul edilebilir güvenilirlik değerleri  $p < 0,05$  olarak belirlenmiştir. Tüm kuruma modelleri içerisinde en yüksek kararlılık katsayısı olan  $R^2$  değeri Midilli-Küçük modelinde olduğu için bu model kuruma eğrilerini en iyi tahmin eden ince tabakalı kuruma modeli olarak belirlenmiştir. Son kalite değeri açısından en uygun renk değerleri 65 °C kurutma sıcaklığında belirlenmiştir. Bu kurutma sıcaklığında belirlenen renk değerleri; kroma (C): 15.47, kırmızlaşma indeksi: 1.97, hue°: 62.16, toplam renk değişim değeri: 27.02 ve kahverengileşme indeksi: 56.54 olarak belirlenmiştir.

## DEVELOPMENT OF TEMPERATURE CONTROLLED MICROWAVE DRYER AND DETERMINATION OF ORANGE DRYING PERFORMANCE

### Keywords

*Temperature Control,  
Microwave Dryer,  
Orange.*

### Abstract

In our country, orange production is in the first place among citrus fruits with an average production amount of seven million tons per annum, but it is consumed as more fruit juices and fresh. In this study, drying performance values of dried orange slices at 55 ( $\pm 2$ ), 65 ( $\pm 3$ ) and 75 ( $\pm 4$ ) °C with temperature controlled microwave drier manufactured within the scope of the thesis project, optimum thin layer drying model and quality value the most suitable color values were determined. The drying process was dried to the extent of 10-13 % relative to the wet base of the product. The average drying times determined for the drying temperatures of 55, 65 and 75 °C are respectively; 390, 150 and 65 minutes respectively. The mathematical model, which predicts the drying curves best by processing the moisture rates moving away from the unit time in thin layer drying models, has been determined. While creating the curves, Page, Midilli-Küçük, Yağcıoğlu and Jane-Das models, which are most commonly used in the literature, were chosen. Acceptable reliability values of all models used were determined as  $p < 0.05$ . Since the highest stability coefficient  $R^2$  value in all the drying models is in the Midilli-Küçük model, this model is determined as the thin layer drying model that best predicts the drying curves. The most suitable color values for the final quality value are determined at the drying temperature of 65 °C. Color values determined at this drying temperature; chrome (C): 15.47,

\* İlgili yazar / Corresponding author: hakan.polatci@gop.edu.tr, +90-356-252-2279

redness index: 1.97, hue°: 62.16, total color change value: 27.02 and browning index: 56.54.

#### Alıntı / Cite

Polatçı, H., Taşova, M., (2020). Sıcaklık Kontrollü Mikrodalga Kurutucu Geliştirilmesi e Portakal Kurutma Performansının Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 131-138.

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

H. Polatçı, 0000-0002-2071-2086  
M. Taşova, 0000-0001-5025-0807

#### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	25.12.2018
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	05.06.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	05.08.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Portakal meyvesi Citrus cinsi bir ağaç olan Citrus sinensis' in bir meyvesidir. Dünyada portakal üretimi Portekiz ve civarında yaygın bir şekilde yetişmekle birlikte ülkemizde ise daha çok Akdeniz Bölgesi, Rize ili ve çevresinde yetişmektedir (Anonim, 2018). Dünya genelinde ortalama 9 milyon hektar alanda turuncgil yetiştirilmekte ve bu alandan ise yaklaşık 130 milyon ton ürün elde edilmektedir. Bu değer ortalama % 57' sini portakal oluşturmaktadır (GTHB, 2014). Dünyada portakal üretimi ortalama 72.3 milyon ton olup (FAO, 2017), bu değer % 26.4' ü Brezilya da yetiştirilmektedir (USDA, 2014). Ülkemizde üretilen portakal miktarı ise 1 950 000 ton olup (TÜİK, 2017), dünya portakal üretiminin yaklaşık % 2.5-3 'ünü oluşturmaktadır.

Portakal bünyesinde polifenol, karatoneid ve C vitamini gibi bir çok antioksidan özelliğe sahip önemli etken maddeleri içermektedir (Mrad ve vd., 2012; Karaslan ve Erdem, 2014). Özellikle C vitamini açısından zengin olan portakal kandaki kolesterol seviyesini düşürme (Maskan, 2000; Soysal, 2004; Karaaslan ve Erdem, 2014), kansere yakalanma riskinin azaltma ve ultraviyole ışınlarına karşı korumada etkisi olduğu bilinmektedir (Anonim, 2014). Portakal meyvesi endüstride daha çok kozmetik ürünlerin ve ilaçların yapımında kullanılmakla birlikte gıda olarak ise genelde dondurma, bisküvi, meyve suyu ve çay yapımında kullanılmaktadır.

Kurutma; tarımsal ürünlerin bünyelerindeki yüksek nemin bozulmadan saklanabileceği kritik bir nem seviyesine kadar düşürüldüğü ve bu esnada ürünün fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinde değişikliklerin oluştuğu, kontrollü şartlar altında yapılan bir ısı ve kütle difüzyon olayıdır.

Portakal ortalama % 80-85 civarında yüksek seviyede su barındırdığından dolayı meyve suyu üretim işletmeleri tarafından yaygın olarak tercih edilmektedir. Diğer taraftan çay, kuru meyve ve gıdalara da katkı maddesi olarak kullanılmasından dolayı portakalın kurutulması gerekmektedir. Portakal meyvesi kurutulduğunda alternatif şekillerde kullanılacaksa eğer besin ve renk değerlerinin korunmasında kurutma yönteminin seçimi önemli bir kriterdir. Portakal meyvesinin kurutulması için genellikle sıcak hava ile yapılan konvektif kurutma yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak bu kurutma yöntemleri hem enerji tüketim açısından uygun olmaması hem de ürün uzun süre ısıya maruz kalmasından dolayı besin değerleri çok fazla parçalanmakta ve rengi kararmaktadır. Bu nedenle portakal kurutulurken hızlı kurutma yöntemlerinin tercih edilmesi gerekmektedir. Mikrodalga kurutma yöntemi bunlardan biri olmasına rağmen mikrodalga enerjinin üründe oluşturduğu ısı kontrol edilememesinden dolayı kurutma işleminde sonlara doğru üründe kısmen de olsa bazı renk kararmalarına neden olmaktadır. Ancak bu etki konvektif kurutma yöntemine göre kıyasla daha azdır.

Mikrodalga kurutma yönteminde, konvektif kurutma yöntemine göre oluşan olumsuzlukları azaltabilmek için mikrodalga ışınımın ürün yüzeyinde oluşturduğu sıcaklık değerinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle sıcaklık veya güç kontrollü mikrodalga kurutucularda ürünlerin kurutulması son kalite değerleri açısından önemlidir. Sıcaklık kontrollü veya güç kontrollü mikrodalga kurutucularla literatürde; elma (Polatçı ve Taşova, 2017; Taşova, 2016; Zhengfeng ve vd., 2010; Cucurollo ve vd., 2012), mango (Akoy ve Höresten, 2015) tarafından yapılan çalışmalar mevcuttur. Ancak literatürde portakal meyvesinin sıcaklık veya güç kontrollü mikrodalga kurutucular kullanılarak yapılan herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu ile 0.5 cm kalınlığında daire şeklinde dilimlenerek 55 ( $\pm 2$ ), 65 ( $\pm 3$ ) ve 75 ( $\pm 4$ ) °C kurutma sıcaklıklarında kurutulan portakal dilimlerinin kuruma performans değerleri, en uygun ince tabakalı kuruma modeli ve son kalite değeri açısından önemli olan en uygun renk değerleri belirlenmiştir.

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

### 2.1. Kurutulacak Ürün (Product to be Dried)

Çalışma materyali Tokat' ta bulunan yerel bir marketten satın alınarak Gaziosmanpaşa Üniversitesi Biyosistem Mühendisliği kurutma laboratuvarına getirilerek kurutma işlemleri sonlanana kadar ürünler  $+4 \pm 0.5$  °C sıcaklığa sahip ortamda saklanmıştır.

Çalışmada kullanılan taze portakal meyvesinin dilim hali şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Taze kurutma materyali (Fresh drying material)

### 2.2. Nem Tayini (Determination of Moisture)

Portakal meyvesi kurutulmadan önce nem içeriği belirlenmiştir. Nem tayini işleminde ortalama  $50 \pm 2$  g örnek kullanılarak kurutma havası sıcaklığı 70 °C ayarlanmış etüvde ağırlık değişimi sabitlenene kadar bekletilmiştir (Yağcıoğlu, 1999). İlk ve son ağırlıkları kaydedilen ürünün yaş baza nem içeriği 1 ve 2 nolu eşitliklere göre hesaplanmıştır.

$$N_y = \frac{W_i - W_s}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

$$N_k = \frac{W_i - W_s}{W_s} \times 100 \quad (2)$$

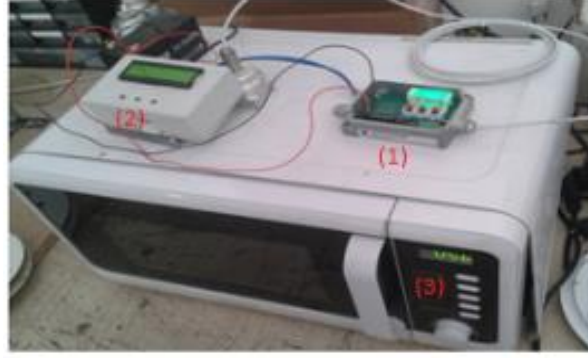
Burada;  $N_y$ : Yaş baza göre nem (%),  $N_k$ : Kuru baza göre nem (%),  $W_i$  : Ürün örneğinin ilk ağırlığı (g),  $W_s$  : Ürün örneğinin son ağırlığı (g)

### 2.3. Kurutma Yöntemi (Drying Method)

Kurutma işlemine başlamadan önce  $\pm 4$  °C sıcaklıkta muhafaza edilen portakal ortam sıcaklığına gelene kadar dış ortamda bekletilmiştir. Meyvelerden benzer boyut ve renklerde olanları seçilerek 0.5 cm kalınlığında daire şeklinde dilimlenmiştir. Daha sonra sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu ile 55 ( $\pm 2$ ), 65 ( $\pm 3$ ) ve 75 ( $\pm 4$ ) °C kurutma havası sıcaklıklarında kurutma işlemleri yapılmıştır. Kurutma işlemleri üçer tekerrür halinde yapılarak her tekerrürde ortalama  $50 \pm 2$  g ürün kullanılmıştır. Kurutucu içerisindeki ürünler belirli süre aralıklarında çıkartılıp % 1 g hassasiyete sahip bir terazi ile tartılarak ürün nemi yaş baza göre % 10-13 seviyesine kadar kurutulmuştur.

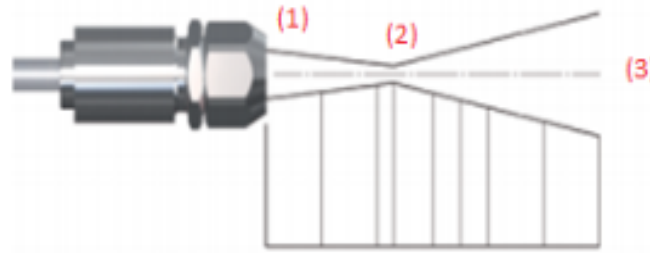
### 2.4. Sıcaklık Kontrollü Mikrodalga Kurutucu (Temperature Controlled Microwave Dryer)

Çalışmada kullanılan kurutucu, sıcaklık kontrollü bir mikrodalga fırın olup içerisinde bulunan cam tepsi üzerine konulan kurutma materyalinin yüzey sıcaklığı temassız kızılötesi sıcaklık sensörü (1) ile ölçülmektedir. Ölçülen değerler kontrol paneline (2) iletilmektedir (Şekil 2,3).



Şekil 2. Sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu (Temperature controlled microwave dryer)

Ürünün yüzey sıcaklığı kontrol panelinde ayarlanan kurutma sıcaklığına ulaştığında mikrodalga fırın otomatik olarak durmakta ve kontrol panelinde belirlenen dinlenme süresi kadar beklemektedir. Ürün sıcaklığı dinlenme süresi sonunda belirlenen kurutma sıcaklığının altına düştüğünde mikrodalga fırın (3) tekrara otomatik olarak çalışmaya başlamaktadır. Eğer bu süre içerisinde ürün sıcaklığı kurutma sıcaklığının alt değerine düşmediği durumda belirlenen süre kadar daha kurutucu çalışmadan beklemektedir. Kurutma işlemi, ürün nem içeriği belirlenen kritik nem değerine düşene kadar bu şekilde devam etmektedir (Taşova, 2016; Polatçı ve Taşova, 2017).



Şekil 3. Sensörün ölçüm biçimi (Sensor measurement form)

Kurutucu üzerinde bulunan temassız kızılötesi sıcaklık sensörü ürünün yüzey sıcaklığını okumaya başladığı andan (1) itibaren sürekli daralmaya gider en dar olduğu nokta (2) artık buradan sonra mikrodalğanın iç kısımlarını görmeye başlamaktadır. Sensörün okuma şeklinin en geniş olduğu (3) kısma kadar yelpaze şeklinde açılmaktadır.

Çalışmada Optris marka CT LT modeli temassız kızılötesi sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Sensör -50 °C ile 975 °C arasında ölçüm yapabilmekte olup, ideal çalışma aralığı ise -20 °C ile 180 °C arasındaki sıcaklık değerleridir. Temassız kızılötesi sıcaklık sensörünün çalışma için gerekli olan güç ihtiyacı 8 - 36 V DC 'dir. Sıcaklık sensörünün bir adet giriş bir adet çıkış noktası bulunmaktadır. Giriş nokta, sıcaklık ölçümü yapan okuma başlığının bulunduğu nokta olup çıkış noktası ise ölçülen sıcaklık değerinin bilgisayar ortamına aktaracak elmanın olduğu yeridir. Ayrıca temassız kızılötesi sıcaklık sensörü 0/4 - 20 mA, 0 - 5 V, 0 - 10 V seçilebilir analog değerleri vardır.

## 2.5. Renk Ölçümü (Color Measurement)

Portakal dilimlerinin kuruma öncesi ve sonrasındaki renk değerleri Minolta marka CR300 model renk ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Cihaz ile taze ve kurutma şartları altında değişen ürünün Hunter Lab Chromameter renk değerleri (L, a, b) değerleri ölçülmüştür.

Bu değerler; " L " ürünün parlaklık değerini ifade etmekte olup 0-100 arasında bir değer almaktadır. " a " kırmızı-yeşil, " b " ise sarı-mavi renkleri ifade etmektedir. Bu değerler + işaretli olursa "a" kırmızıyı "b" sarı renkte olduğunu - işaretli değerler alırsa "a" yeşil ve "b" mavi renkte olduğunu ifade etmektedir (McGuire, 1992). Ölçülen L, a ve b değerleri ürün hakkında tek başına bir anlam ifade etmezken bu değerler kullanılarak hesaplanan kroma, kırmızılık indeksi, hue açısı, toplam renk değişimi ve kahverengileşme indeks değerleri belirlenmiştir. Bu değerler;

**Kroma Değeri:** Portakal dilimlerine ait rengin tonunu ifade etmekte olup solgun renklerde kroma değeri düşük canlı renklerde ise yüksek değerler almaktadır. Kavdır ve vd. (2007), ürünlerin kroma değerlerini belirlerken 1 nolu eşitliği kullanarak hesapladıklarını ifade etmişlerdir.

$$C = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (3)$$



Burada; a: kırmızılığı, b: sarılığı ifade etmektedir.

**Hue Değeri:** Üründe ölçülen "a" ve "b" değerlerinin 360° lik bir renk dairesinde konumlandırılarak her açıya karşılık gelen renk ve tonlarının ne olduğu anlaşılmaktadır. Hue renk açısı değeri belirlenirken 2 nolu eşitlik kullanmıştır.

$$h^{\circ} = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4)$$

Burada; a: kırmızılığı, b: sarılığı,  $\tan^{-1}$ : oranın arctanjant değerinin hesaplanmasını ifade etmektedir.

**Toplam Renk Değişim Değeri:** Taze ürünün renk değerlerine göre kurutma şartlarının etkilediği toplam renk farklılığını belirlemek için kullanılmaktadır. Garau ve vd. (2007), toplam renk farklılık değerini belirlemek için 3 nolu eşitliği kullanmıştır.

$$\Delta E = \sqrt{(L_t - L_k)^2 + (a_t - a_k)^2 + (b_t - b_k)^2} \quad (5)$$

Burada;  $L_t$ ,  $a_t$  ve  $b_t$  değerleri sırasıyla taze posanın parlaklık, kırmızı-yeşillik ve sarılık-mavilik renk değerlerini ifade ederken,  $L_k$ ,  $a_k$  ve  $b_k$  değerleri ise kurutulmuş ürüne ait sırasıyla aynı renk değerlerini ifade etmektedir.

**Kahverengileşme İndeks Değeri:** Ürünün kahverengileşme indeks değerini ifade eden simge " BI " ve bu değer hesaplanmasında ise " x " katsayısı değeri kullanılmaktadır. Plou ve vd. (1999)' na göre "BI" ile "x" katsayısı değerlerinin belirlenmesi için 4 ve 5 nolu eşitlikleri kullanmıştır.

$$BI = \frac{[100(x - 0,31)]}{0,17} \quad (6)$$

$$x = \frac{a + (1,75xL)}{[(5,645xL) + (a - (3,012xb))]} \quad (7)$$

Burada; x: katsayı, a: kırmızılık, L: parlaklık, b: sarılık değerlerini ifade etmektedir.

## 2.6. Kuruma Modeli (Drying Model)

Kurutulan ürünün zamana bağlı ayrılan nem oranı değerlerini belirlemek için 6 nolu eşitlik kullanılmıştır.

$$ANO = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (8)$$

Burada; ANO: Ayrılabilir nem oranı, M: Ürünün anlık nem içeriği,  $M_e$ : Ürüne ait verilen durumdaki denge nemi,  $M_0$ : Ürünün başlangıç nem içeriğini ifade etmektedir.

Kuruma eğrilerini oluşturmak için yaygın olarak kullanılan Page, Midilli-Küçük, Yağcıoğlu ve Jane-Das kuruma modelleri seçilmiştir. Modellere ait eşitlikler Tablo 1' de verilmiştir.

**Tablo 1.** İnce tabaka matematiksel kuruma modelleri (Thin layer mathematical drying models)

No	Model ismi	Eşitlik
1	Page	$MR = \exp(-h \cdot (t^j))$
2	Midilli-Küçük	$MR = h \cdot \exp(-j \cdot (t^k)) + (1-t)$
3	Yağcıoğlu	$MR = k \cdot \exp(-h \cdot t) + j$
4	Jane-Das	$MR = k \cdot \exp(-h \cdot t + j \cdot (t^{1/2}) + m)$

Burada; MR: Nem oranı, h,t,j,i,k,l,m: modellere ait katsayıları ifade etmektedir.

Tablo 1'de verilen ince tabakalı kurutma modellerinden Page modelini Page, (1949), Midilli-Küçük modelini Midilli

ve vd. (2002), Yağcıoğlu modelini Polatcı ve Taşova, (2017) ve Jane-Das modelini ise Yıldız ve vd. (2015) yapılan çalışmalarda kullanılmıştır.

### 3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

#### 3.1. Kurutma Verileri (Drying Data)

Kurutulan portakal dilimlerinin yaş baza göre ortalama nem içeriği % 83.40 olarak belirlenmiştir. Ürün yapılan sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutma şartları altında göstermiş olduğu ortalama kuruma süreleri belirlenmiştir.

Mikrodalga kurutma sıcaklıkları ürünün kuruma performansını etkilediği ve sıcaklık değerlerinin artmasıyla kuruma sürelerinin büyük oranda azaldığı belirlenmiştir (Tablo 2). Akoy ve Hörösten (2015), sıcaklık kontrollü bir kurutucu ile yaptıkları mango dilimleri kurutma çalışmalarında sıcaklık değerinin yükselmesiyle kuruma sürelerinde önemli seviyede azalmanın olduğunu belirlemişlerdir. Cucurullo ve vd. (2012), sıcaklık kontrollü kurutucu ile 50, 60 ve 70 °C sıcaklıklarda kuruttukları elma dilimlerinin kuruma süreleri ile sıcaklık değerleri arasında ters bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir.

**Tablo 2.** Örneklerin kuruma performans değerleri (Drying performance values of the samples)

Kurutma sıcaklıkları	Son nem (%)	Kurutma süreleri (dk)
55 °C	9.53	390
65 °C	12.01	150
75 °C	13.62	65

#### 3.2. Kuruma Modellerine Ait Katsayılar ve "R<sup>2</sup>" Değerleri (Coefficients and "R<sup>2</sup>" Values of Drying Models)

Yapılan sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutma şartları altında belirlenen portakal dilimlerine ait süreye bağlı ayrılabilir boyutsuz nem oran değerleri kullanılarak ince tabakalı kuruma eğrileri oluşturulmuştur. Belirlenen kuruma eğrilerine ait katsayı, varyans analizi (p) ve kararlılık değerleri (R<sup>2</sup>) belirlenmiştir (Tablo 3, 4, 5 ve 6). Seçilen kuruma modelleri içerisinde en yüksek R<sup>2</sup> değeri 65 °C kurutma koşulunda Midilli-Küçük modelinde belirlenmiştir. Tüm kurutma sıcaklıkları için oluşturulan kuruma eğrilerinin güvenilirlik değerlerinin p<0.001 olarak belirlendiği yani kullanılmalarının uygun olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 3.** Page modeline ait hesaplanan değerler (Calculated values for the Page model)

Kurutma sıcaklıkları	k	h	R <sup>2</sup>
55 °C	0.2448	1.2766	0.992
65 °C	0.7697	1.5703	0.999
75 °C	0.0144	1.3296	0.997

**Tablo 4.** Midilli-Küçük modeline ait hesaplanan değerler (Calculated values for the Midilli-Küçük model)

Kurutma sıcaklıkları	k	h	j	m	R <sup>2</sup>
55 °C	0.997	1.003	0.221	-0.035	0.999
65 °C	1.510	0.999	0.738	-0.011	0.999
75 °C	1.336	1.017	0.015	0.001	0.998

**Tablo 5.** Yağcıoğlu modeline ait hesaplanan değerler (Calculated values for the Yağcıoğlu model)

Kurutma sıcaklıkları	k	h	j	R <sup>2</sup>
55 °C	1.469	0.170	-0.469	0.999
65 °C	1.488	0.466	-0.466	0.993
75 °C	1.156	0.036	-0.098	0.990

**Tablo 6.** Jane-Das modeline ait hesaplanan değerler (Calculated values for the Jane-Das model)

Kurutma sıcaklıkları	k	h	j	m	R <sup>2</sup>
55 °C	1.026	0.579	0.458	0.021	0.980
65 °C	1.029	0.866	-0.115	0.025	0.964
75 °C	1.039	0.426	0.763	0.036	0.985

### 3.3. Renk Değerleri (Color Values)

Taze ve kurutulmuş portakal dilimlerine ait ölçülen ve hesaplanan ortalama renk değerleri belirlenmiştir (Tablo 7 ve 8). Tablo 7' ye göre kurutulmuş ürünlerde ölçülen a ve b değerleri tazeye göre çok fazla uzaklaşmıştır. Kuru ürünlere ait ölçülen L değerleri arasında ise sadece 55 ve 65 °C sıcaklarda belirlenen değerler tazeye en yakın olarak belirlenmiştir.

**Tablo 7.** Ölçülen renk değerleri (Measured color values)

Kurutma şartları	L	a	b
Taze	42.09 <sup>a</sup>	-0.25 <sup>b</sup>	18.33 <sup>a</sup>
55 °C	38.44 <sup>ab</sup>	7.32 <sup>a</sup>	12.76 <sup>b</sup>
65 °C	38.74 <sup>ab</sup>	7.09 <sup>a</sup>	13.68 <sup>b</sup>
75 °C	35.17 <sup>b</sup>	7.29 <sup>a</sup>	10.67 <sup>b</sup>

Tablo 8' e göre kurutulmuş ürünlere ait hesaplanan kroma, toplam renk farklılığı, hue ve kahverengileşme indeks gibi renk değerlerinin hepsi tazeye göre farklı olduğu belirlenmiştir. Kurutulmuş ürünlerin son kalite değerleri hakkında kroma değeri önemli bir fikir vermektedir. Kroma değeri açısından kurutulmuş ürünler kendi aralarında kıyaslandığında tazeye en yakın değer 65 °C kurutma koşulunda olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 8.** Hesaplanan renk değerleri (Calculated color values)

Kurutma şartları	C	H°	ΔE	BI
Taze	18.34	53.27	-	-
55 °C	14.84	58.88	27.06	53.60
65 °C	15.47	62.16	27.02	56.54
75 °C	13.26	52.00	25.04	50.04

Garau ve vd. (2014)' na göre sıcak havalı konvektif bir kurutucu ile farklı kurutma koşullarında yaptıkları portakal kabuğu kurutma çalışmalarında uyguladıkları normal seviyedeki sıcaklık değerlerinde belirlenen L değerleri tazeye göre daha yakın olduğunu belirlemişlerdir. Taşova (2016)' ya göre sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu ile 50, 60 ve 70 °C sıcaklıklarda yaptığı elma kurutma çalışmasında kroma değeri açısından tazeye göre en yakın değerleri 50 ve 60 °C kurutma koşullarında aldığını belirlemiştir. Polatçı ve Taşova (2017)' ye göre sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucuda farklı kurutma sıcaklıklarında yaptığı alıç meyvesi kurutma çalışmasında kurutulmuş ürünlerin a değerleri tazeye göre çok fazla uzaklaştığını ifade etmişlerdir.

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

Portakal meyvesi bünyesinde barındırdığı temelde C vitamini olmak üzere diğer besin değerlerince de zengin olmasıyla insan sağlığı açısından çok önemli bir turuncu meyvedir. Çalışmada kapsamında tasarlanıp imal edilen sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu ile 55, 65 ve 75 °C kurutma koşullarında kurutulmuş portakal dilimlerinin kuruma performans, renk ve en uygun ince tabakalı kuru modeli belirlenmiştir. Belirlenen değerlere göre;

1) Mikrodalga ışımının ürün yüzeyinde oluşturduğu sıcaklık değerleri ürünün kuruma süresi ve renk değerlerinde etkili olduğu belirlenmiştir.

2) En uzun kuruma süresi 55 °C sıcaklıktaki kuruma koşulunda belirlenirken ortalama kuruma süresinin 6.5 saat sürdüğü belirlenmiştir. En kısa kuruma süresi ise 75 °C sıcaklıktaki kuruma koşulunda ortalama kuruma süresinin ise 65 dakika sürdüğü belirlenmiştir.

3) Uygulanan ince tabakalı kuruma modelleri içerisinde en yüksek  $R^2$  değeri  $65\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığında belirlenen boyutsuz nem oranı değerleri ile Midilli-Küçük modelinde belirlenmiştir. Bu model seçilen kuruma modelleri içerisinde kuruma eğrilerini en iyi tahmin eden model olarak belirlenmiştir.

4) Kurutulmuş portakal dilimlerine ait kroma renk değerleri ürünün ticari değeri için önemli bir kriter olarak ön plana çıkmaktadır. Kurutulmuş son ürünlerin kroma değerleri açısından uygun kurutma koşulunun  $65\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta yapılan kurutma işleminde belirlenmiştir.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

### Kaynaklar (References)

- Agudo, J.E., Pardo, P.J., Sánchez, H., Pérez, A.L., Suero, M.I., 2014. A Low Cost Real Color Picker Based on Arduino”, *Sensors*, 14 (7), 11943-11956.
- Akoy, E.O.M., Hörösten, D.V., 2015. Microwave Drying of Mango Slices at Controlled Temperatures. ISSN 2028-9324, 12 (2), 374-383.
- Anonim,2018. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Portakal> (Erişim Tarihi: 22.05.2018).
- Cucurullo, G., Giordano, L., Albanese, D., Cinquanta, L., Matteo, D.M., 2012. Infrared thermography assisted control for apples microwave drying. *Journal of Food Engineering* 112, 319-325.
- FAO, 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations Production Statistics, <http://www.fao.org> (Erişim Tarihi: 22.05.2018).
- Gara, M.C., Simal, S., Femenia, A., Rosello, C., 2006. Drying of orange skin: drying kinetics modelling and functional properties. *Journal of Food Engineering* 75, 288-295.
- GTHB, 2014. Turunçgil, zeytin incir ve diğer subtropik meyveler araştırmaları çalışma gurubu. [www.tarim.gov.tr](http://www.tarim.gov.tr).
- Karaaslan, S., Erdem, T., 2014. Mathematical Modelling of Orange Slices during Microwave, Convection, Combined Microwave and Convection Drying, *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi* 1(2), 143-149.
- Kavdır, İ., Kocabıyık, H., Biyükcen, C.K., 2007. Farklı Renk Sistemlerinin Elmanın Hasat Sonrası Değerlendirmesindeki Etkinlikleri. *Tarımsal Mekanizasyon 24. Ulusal Kongresi*, 5-6 Eylül, Kahramanmaraş.
- Maskan, M., 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48, 177-182.
- McGuire, R.G., 1992. Reporting of objective color measurements. *HortScience*, 27, 1254 - 1255.
- Mrad, N.D., Boudhrioua, N., Kechaou, N., Courtois, F., Bonazzi, C., 2012. Influence of air drying temperature on kinetics, physicochemical properties, total phenolic content and ascorbic acid of pears. *Food and Bioproducts Processing* 90 (3), 433-441.
- Plou, E., Lopez, M.A., Barbosa C.G.V., Welti C.J., Swanson, B.G., 1999. Polyphenoloxidase activity and color of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree. *Journal of Food Science*, 64, 42-45.
- Sarıkulak, N., 2017. Kirazın farklı kurutucularda kurutulması ve kalite parametrelerinin belirlenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Soysal, Y., Oztekin, S., Eren, O., 2006. Microwave drying of parsley: Modelling, kinetics, and energy aspects. *Biosystems Engineering* 93(4), 403-413.
- Polatçı, H., Taşova, M., 2017. Sıcaklık Kontrollü Mikrodalga Kurutma Yönteminin Alıç (*Crataegus* spp. L.) Meyvesinin Kuruma Karakteristikleri ve Renk Değerleri Üzerine Etkisi. *Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(10): 1130-1135.
- Taşova, M., 2016. Sıcaklık Kontrollü Bir Mikrodalga Kurutucu Geliştirilmesi Ve Performansının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat.
- TÜİK, 2017. <http://www.tuik.gov.tr> (Erişim Tarihi: 22.05.2018).
- United States Department of Agriculture, 2014. <http://www.turktob.org.tr> (Erişim Tarihi: 22.05.2018).
- Yağcıoğlu, A., 1999. Tarımsal Ürünleri Kurutma Tekniği. Ege Üniversitesi ziraat fakültesi yayınları No: 536. Bornova, İzmir.
- Zhengfeng, L., Raghavan G.S.V., Orsat, V., 2010. Temperature and power control in microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 97;478-483.



## NUMUNE GEOMETRİSİ VE YÜKLEME HIZI KOŞULLARININ KAYA MALZEMELERİ DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI DEĞERLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Eren KÖMÜRLÜ\*

Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Dolaylı Çekme Dayanımı,  
Brezilyan Testi,  
Kaya Mekaniği Deneyleri,  
Numune Geometrisi,  
Yükleme Hızı.*

### Öz

Bu çalışmada, aynı çap ve farklı boy/çap oranlarına sahip kaya malzemesi numuneleri deformasyon kontrollü ve yük kontrollü olarak farklı yükleme hızı koşullarında test edilmiştir. 5 farklı kaya malzemesi ve toplam 90 adet dolaylı çekme dayanımı (Brezilyan) testi numunelerinden elde edilen sonuçlara göre, yük kontrollü bir yükleme hızı (kN/s) seçimi koşulunda boy/çap oranı artışı ile hesaplanan dayanım değerlerinde belirgin ölçüde azalma olduğu görülmüştür. Numune geometrisi etkisinin minimize edilmesi, farklı boy/çap oranlarına sahip numunelerden benzer dayanım değerlerinin elde edilmesi için deformasyon kontrollü yükleme hızı (mm/dakika) seçilerek dolaylı çekme dayanımı testlerinin gerçekleştirilmesi önerilmiştir.

## SPECIMEN GEOMETRY AND LOADING RATE CONDITION EFFECT ON INDIRECT TENSILE STRENGTH VALUES OF ROCK MATERIALS

### Keywords

*Indirect Tensile Strength,  
Brazilian Test,  
Rock Mechanics Experiments,  
Specimen Geometry,  
Loading Rate.*

### Abstract

In this study, rock core specimens with same diameter and different length to diameter ratios were tested under deformation controlled and load controlled various loading rate conditions. According to the results obtained from 5 different types of rock material and 90 specimens tested in this study, measured indirect tensile strength values were found to significantly increase with a decrease in the ratio of length to diameter under load controlled loading rate (kN/s) condition. To minimize the effect of geometry of the specimens and obtain similar results from specimens with different length to diameter ratios, the indirect tensile strength (Brazilian) test was suggested to carry out under the condition of deformation controlled loading rate (mm/min) selection.

### Alıntı / Cite

Kömürlü, E., (2020). Numune Geometrisi Ve Yüklem Hızı Koşullarının Kaya Malzemeleri Dolaylı Çekme Dayanımı Değerleri Üzerindeki Etkileri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 139-145.

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

E. Kömürlü, 0000-0002-2123-7678

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	10.08.2018
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	09.04.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	09.08.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Kaya malzemelerinin çekme dayanımı değerlerinin belirlenmesi için birçok doğrudan ve dolaylı test yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler arasında en yaygın kullanılanı pratik olması sebebi ile Brezilyan çekme (yarmada çekme dayanımı) testidir. Deney Brezilyalı Profesör Fernando L.L.B. Carneiro tarafından geliştirilmiştir. Önemli bir beton danışmanı olan Profesör Carneiro danışmanlık yaptığı bir çalışmada eski bir kilisenin beton silindirler üzerinde yürütülerek taşınması esnasında yüklenen silindirlerin düşey yönde çatladığını görünce Brezilyan çekme testinin geliştirilmesi için önemli bir bulguya ulaşmıştır.

\* İlgili yazar / Corresponding author: ekomurlu@giresun.edu.tr, +90-454-310-1740

Profesör Carneiro silindirik beton numunelerinin çapsal sıkışma nedeni ile oluşan çekme gerilmeleri altında test edilmesine yönelik geliştirdiği deneysel yöntemini ilk kez 1943 yılında paylaşmıştır (Carneiro, 1943; Fairbairn ve Ulm, 2002). Carneiro (1943) tarafından deney yönteminin yayınlanmasından 2 ay sonra Japonya'lı bilim adamı Tsunei Akazawa, bağımsız olarak geliştirmiş olduğu aynı yöntem ile yarmada çekme dayanımı deneyini doktora tezi olarak sunmuştur (Akazawa, 1943).

Bir beton deneyi olarak bulunmuş olsa da, Brezilyan çekme testi pratikliği sebebi ile kaya numunelerine yönelik yaygınlaşmış ve detaylandırılmıştır. Kaya malzemesi numunelerinin Brezilyan çekme testi ile dolaylı çekme dayanımı değerlerinin belirlenmesi için çeşitli yönetsel detaylar ilgili standartlar ve ISRM (Uluslararası Kaya Mekaniği ve Kaya Mühendisliği Birliği) önerilerinde belirtilmiştir (ISRM, 2007; ISRM, 1978; ASTM D3967-16, 2016).

Deney sonucunu etkileyen önemli parametrelerden biri yükleme hızıdır. Yükleme hızı birim zamanda yük artışına bağlı (yük kontrollü) veya birim zamanda platenin düşey yönde deplasmanına bağlı (deformasyon kontrollü) olarak sırası ile kN/saniye veya mm/dakika gibi farklı birimlerde tercih edilebilmektedir. Birimi farketmeksizin, yükleme hızı değerindeki artış ile ölçülen dolaylı çekme dayanımı değerlerinde de artış yaşanmaktadır (Li vd., 2007; Yu vd., 2017; Gong ve Zhao, 2014).

Numune boy/çap oranı Brezilyan deneyi sonuçlarını önemli ölçüde etkilemekte olan bir diğer önemli parametredir. Bu oranın artışı ölçülen çekme dayanımı değerlerinde azalmaya neden olmaktadır (Kömürlü ve Kesimal, 2015; Kömürlü ve Kesimal, 2012; Aliha, 2014; Yu vd., 2006).

Bu çalışmada, farklı boy/çap oranlarına sahip numuneler yük ve deformasyon kontrollü yükleme hızları tercih edilerek test edilmiş ve numune geometrisinin dayanım değerleri üzerindeki etkilerinin farklı yükleme koşulları altında nasıl değiştiği incelenmiştir.

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

Bu çalışmada, Artvin ilinden alınan 5 farklı kaya malzemesinin dolaylı çekme dayanımı değerleri belirlenmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi NX (54.7 mm) çapında elmas uçlu karotiyer bıçak kullanılarak alınan karotlar farklı boy/çap oranlarında kesilmiştir. Deformasyon kontrollü ve yük kontrollü yükleme koşulları için üçer farklı boy/çap oranlarında (0,3, 0,6, 0,9) numuneler hazırlanmıştır. Yük kontrollü yükleme koşullarında ISRM (2007) önerilerine uygun olarak yükleme hızı 0,2 kN/saniye olarak seçilmiştir.

Deformasyon kontrollü yükleme koşulunda test edilen numuneler ise 0,2 mm/dakika yükleme hızı altında test edilmiştir. Dolaylı çekme dayanımı testleri ISRM (2007) tarafından önerilen 8.1 cm yay çapında geometriye ve çelik malzeme özelliklerine sahip, 5.5 cm numune boyu doğrultusunda temas uzunluğu limiti olan çene kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Dolaylı çekme dayanımı değerleri ISRM(2007) tarafından önerilen Eşitlik 1'de görülen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_{tB}=0,637F/(Dt) \quad (1)$$

Eşitlik 1'deki  $\sigma_{tB}$  dolaylı çekme dayanımı (MPa), F kırılma yükü (kN), D numune çapı (cm), t numune boyudur (cm). Deformasyon ve yük kontrollü hız tercihi koşullarında yükleme yapabilmek için testlerde iki farklı cihaz kullanılmıştır. Deformasyon kontrollü testlerde 5 ton kapasiteli elektrik motorlu bir cihaz, yük kontrollü hızın seçildiği testlerde ise 30 ton kapasiteli bir hidrolik pres kullanılmıştır. Deformasyon kontrollü testlerde deplasman ölçümü için LVDT kullanılmıştır. Numunelerin boyları hassas olarak dijital verniyeli kumpas ile ölçülerek her boy/çap oranı grubu içerisindeki üç milimetreyi geçmeyen boy farkları dayanım değerleri hesaplanırken dikkate alınmıştır.

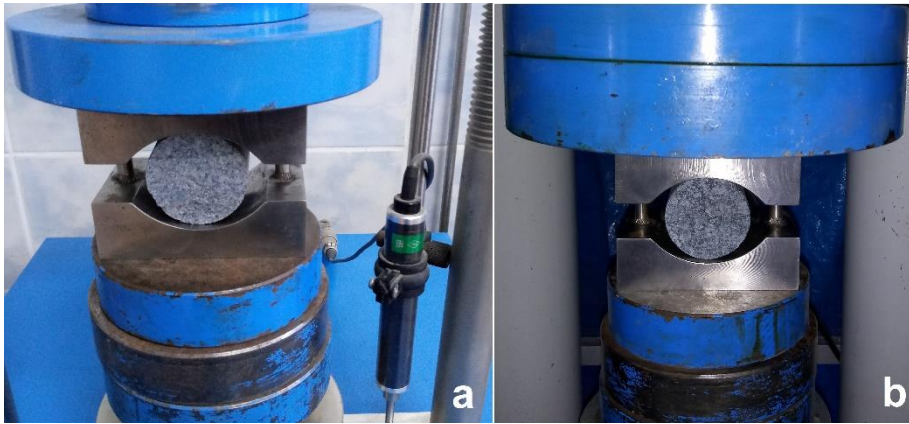
Farklı yükleme hızı birimi tercih edilirken kullanılan farklı cihazlardan elde edilen çekme dayanımı değerleri birbirleri ile kıyaslanmamıştır. Bu çalışmada, numune geometrisinin değişmesi sonucunda ölçülen dayanım değerleri ilgili yükleme hızı birimi koşulu içerisinde değerlendirilmiştir.

## 3. Bulgular (Results)

Dolaylı çekme dayanımı (Brezilyan) testlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Farklı yükleme koşulları altında boy/çap oranı ve hesaplanan dayanım değerleri arasındaki ilişki grafiksel olarak Şekil 3-7'de görülmektedir. Ayrıca, Tablo 3'te farklı yükleme hızı koşullarında boy/çap oranına bağlı değişen dayanım değerleri arasındaki oranlar verilmiştir.



Şekil 1. Numune hazırlama: Karot alma (a), karot kesme (b)(Specimen preparation: coring (a), core cutting (b))



Şekil 2. Deformasyon kontrollü (a) ve yük kontrollü (b) hız koşullarına sahip dolaylı çekme dayanımı testleri (indirect tension tests with deformation controlled (a) and load controlled (b) rate conditions)

**Tablo 1.** Yük kontrollü testlere göre hesaplanan dolaylı çekme dayanımı ( $\sigma_{tB}$ ) değerleri (Indirect tensile strength ( $\sigma_{tB}$ ) values calculated in accordance with the tests with load controlled rate) (N.S.= Numune sayısı/ Number of specimen, S.D.= Standart sapma/ Standard deviation)

Malzeme	t/D: 0,3			t/D:0,6			t/D:0,9		
	$\sigma_{tB}$ (MPa)	N.S	S.D. (MPa)	$\sigma_{tB}$ (MPa)	N.S	S.D. (MPa)	$\sigma_{tB}$ (MPa)	N.S	S.D. (MPa)
Kireçtaşı	4,89	3	0,16	4,05	3	0,14	3,44	3	0,15
Bazalt	5,70	3	0,23	4,82	3	0,19	3,56	3	0,13
Granit	7,61	3	0,28	6,44	3	0,31	5,13	3	0,24
Silttaşı	3,46	3	0,12	2,65	3	0,12	2,07	3	0,09
Dasit	6,56	3	0,20	5,77	3	0,26	4,68	3	0,21

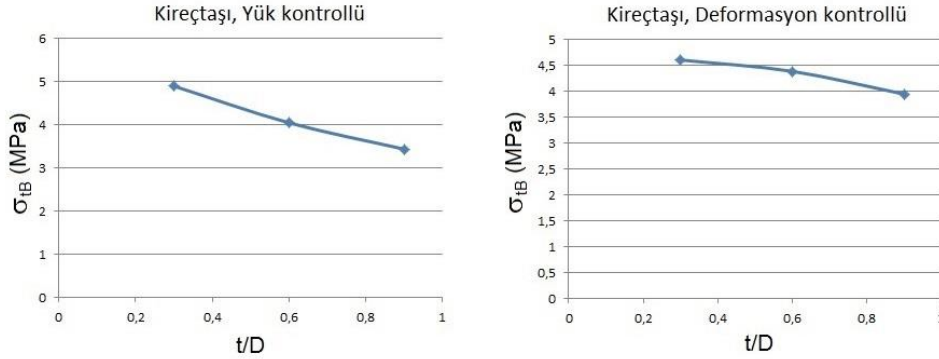
**Tablo 2.** Deformasyon kontrollü testlere göre hesaplanan dolaylı çekme dayanımı ( $\sigma_{tB}$ ) değerleri (Indirect tensile strength ( $\sigma_{tB}$ ) values calculated in accordance with the tests with deformation controlled rate)

Malzeme	t/D: 0,3			t/D:0,6			t/D:0,9		
	$\sigma_{tB}$ (MPa)	N.S	S.D. (MPa)	$\sigma_{tB}$ (MPa)	N.S	S.D. (MPa)	$\sigma_{tB}$ (MPa)	N.S	S.D. (MPa)
Kireçtaşı	4,61	3	0,19	4,39	3	0,20	3,95	3	0,16
Bazalt	5,83	3	0,22	5,41	3	0,17	5,08	3	0,19
Granit	7,16	3	0,27	6,57	3	0,23	6,38	3	0,25
Silttaşı	3,23	3	0,14	2,90	3	0,11	2,46	3	0,10
Dasit	4,85	3	0,18	4,42	3	0,14	4,11	3	0,17

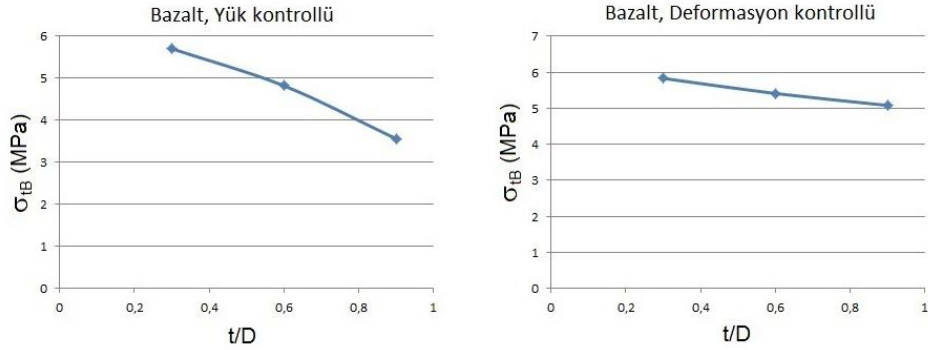


**Tablo 3.** Boy/çap oranına bağlı dayanım değerlerindeki düşüş oranları ( $\sigma_{tB3}$ ,  $\sigma_{tB6}$ ,  $\sigma_{tB9}$  sırası ile boy/çap oranı 0,3, 0,6 ve 0,9 durumunda ölçülen dolaylı çekme dayanımı değerleridir) (Ratios of the decrease in the strength values depending on the length to diameter ratio ( $\sigma_{tB3}$ ,  $\sigma_{tB6}$ ,  $\sigma_{tB9}$  are strength values for the length/diameter ratios of 0.3, 0.6 and 0.9, respectively))

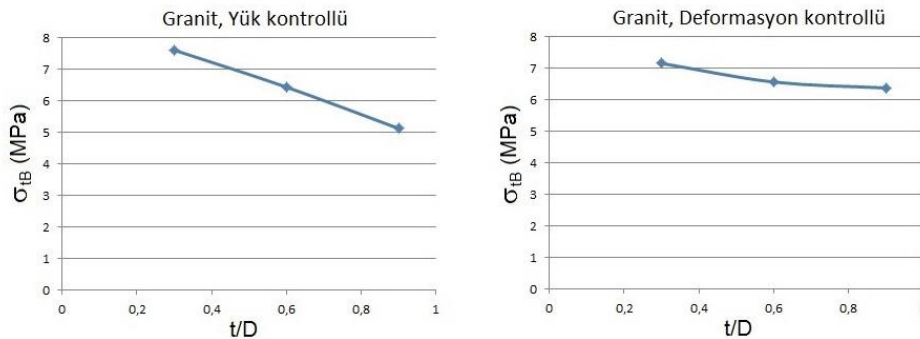
Malzeme	Yük Kontrollü testler		Deformasyon kontrollü testler	
	$\sigma_{tB6}/\sigma_{tB3}$	$\sigma_{tB9}/\sigma_{tB3}$	$\sigma_{tB6}/\sigma_{tB3}$	$\sigma_{tB9}/\sigma_{tB3}$
Kireçtaşı	0,83	0,70	0,95	0,86
Bazalt	0,85	0,62	0,93	0,87
Granit	0,85	0,67	0,92	0,89
Silttaşı	0,77	0,60	0,90	0,76
Dasit	0,88	0,71	0,91	0,85



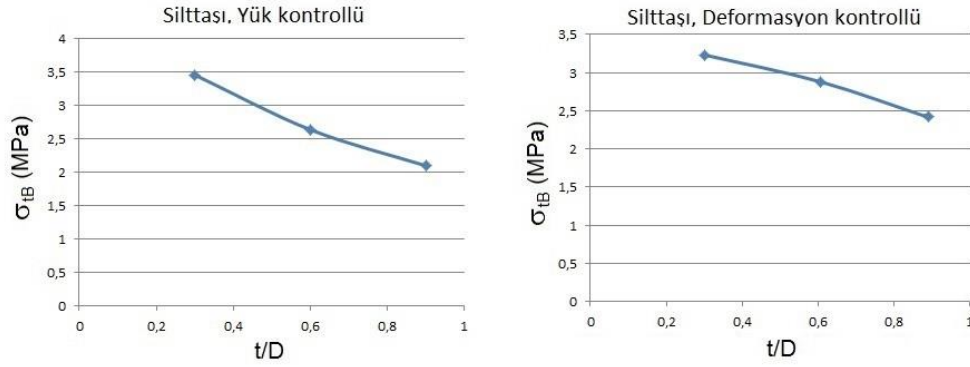
**Şekil 3.** Kireçtaşı numunelerinden elde edilen dolaylı çekme dayanımı ve boy/çap oranı ilişkisi (Relation between length to diameter ratio and indirect tensile strength values of limestone specimens)



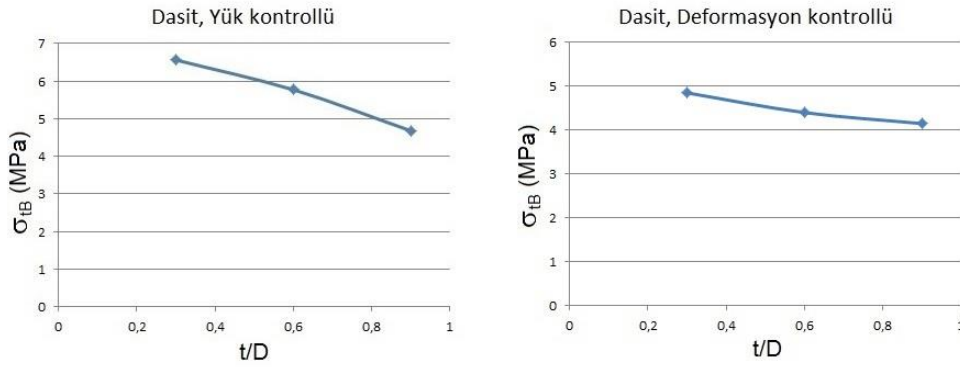
**Şekil 4.** Bazalt numunelerinden elde edilen dolaylı çekme dayanımı ve boy/çap oranı ilişkisi (Relation between length to diameter ratio and indirect tensile strength values of basalt specimens)



**Şekil 5.** Granit numunelerinden elde edilen dolaylı çekme dayanımı ve boy/çap oranı ilişkisi (Relation between length to diameter ratio and indirect tensile strength values of granite specimens)



Şekil 6. Silttaşı numunelerinden elde edilen dolaylı çekme dayanımı ve boy/çap oranı ilişkisi (Relation between length to diameter ratio and indirect tensile strength values of siltstone specimens)



Şekil 7. Dasit numunelerinden elde edilen dolaylı çekme dayanımı ve boy/çap oranı ilişkisi (Relation between length to diameter ratio and indirect tensile strength values of dacite specimens)

#### 4. Tartışma ve Sonuç (Discussions and Conclusion)

Elde edilen sonuçlara göre, boy/çap oranındaki artışa bağlı olarak ölçülen dolaylı çekme dayanımı değerlerindeki azalma oranı kaya malzemesine bağlı olan bir değişkendir ve bu konuda kaya malzemeleri için genel bir oran ifade etmek doğru olmayacaktır.

Brezilyan testinde numune üç eksenli gerilme dağılımına maruz kalarak kırılmaktadır. Bu durum, Brezilyan testinin doğrudan tek eksenli çekme dayanımı değerlerini temsil edememesi açısından dikkate alınmalıdır. Maksimum çekme gerilmelerinin olduğu numunenin dairesel kesit merkezine düşey yönde sıkışma gerilmesi, yatay çap doğrultusunda çekme gerilmesi (yarmayı sağlayan major çekme gerilmesi), numune boyu (kalınlığı) doğrultusunda ve yatay yönde yine çekme gerilmesi etkimektedir. Farklı doğrultularda ve büyüklüklerde gerilmeler altında dayanım değerlerinin kaya malzemesinin kendi mekanik özelliklerine bağlı değişmesi boy/çap oranındaki artış ile ölçülen dayanımlardaki farklı oranlarda azalma için açıklayıcı bir nedendir (Xu vd., 2016; Jianhong, vd. 2009; Ye vd., 2012).

Farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen numerik analizlerde dairesel kesit merkezinde oluşan çekme gerilme değerleri numune boyu doğrultusunda dış yüzeylerde maksimum değerlerine ulaşmaktadır. Numune boyunun artışı ile aynı yük/boy oranı (F/t) için numune içerisinde oluşan maksimum çekme gerilmesi değerleri artmaktadır (Yu vd., 2006; Huafeng vd., 2012; Kömürlü vd., 2016). Bu sebeple, boy arttıkça dayanım değerlerine ulaşılması ve numunenin yenilmesi için yük değerleri daha düşük oranda artarak Eşitlik 1'e göre hesaplanan dolaylı çekme dayanımı değerleri azalmaktadır. Geometrinin numune içerisindeki gerilme dağılımlarına olan etkilerinin yanı sıra, numune boyu artışı ile mikro süreksizliklerin oransal artışı ölçülen dayanım değerlerindeki azalma açısından önemlidir.

Diğer önemli bir faktör ise kaya malzemesinin deformasyon özelliklerine bağlı olarak yükleme esnasında çene ile temas açısının numuneye göre değişiklik göstermesidir. Standart çene kullanımı koşulunda NX boyutunda karotiyer ile hazırlanan farklı kaya malzemesi numuneleri için temas açısı genellikle 80 ve 30o arasında değişmektedir. Temas açısındaki farklılıklar kaya numuneleri içerisindeki gerilme dağılımlarını önemli ölçüde etkilemektedir (Kourkoulis vd., 2013; Erarslan vd., 2012; Markides ve Kourkoulis, 2016; Markides vd., 2010). Ayrıca, düşey gerilmelerden kaynaklı yanal gerilme oluşumu için belirleyici olan Poisson oranı disk numuneleri

içerisindeki gerilme dağılımlarını etkileyen, farklı kaya malzemeleri için değişen gerilme dağılımlarına sebebiyet veren bir diğer parametredir (Lin vd., 2016).

ISRM önerilerinde yer aldığı gibi yük kontrollü yükleme hızı seçimi durumunda, boy/çap oranı arttıkça dayanım değerlerinde önemli oranda azalma olduğunun görülmüş olması önceki diğer çalışmalar ile paraleldir (Kömürlü ve Kesimal, 2015; Kömürlü ve Kesimal, 2012; Aliha, 2014; Guinea vd., 2000). Sabit yük altında numune boyu arttıkça kontak bölgesinde gerilme değerleri ve birim temas uzunluğu başına yük değerleri (kN/cm) azalmaktadır. Yükleme esnasında gerilme artışı değerlerindeki düşüş ölçülen dayanım değerlerinde de düşüşe sebep olmaktadır. Yük kontrollü hız koşullarında numune boyunun artması ile gerilme ve birim uzunluk başına yük değerlerindeki artış hızının azalması ölçülen dayanım değerlerindeki düşüşe neden olmaktadır (Kömürlü ve Kesimal, 2017; Markides ve Kourkoulis, 2013; Fabjan vd., 2015).

Yük kontrollü bir hız tercih edildiğinde numune üzerindeki toplam yük değerlerindeki artış hızı sabittir. Buna karşın, deformasyon kontrollü bir yükleme hızı tercihinde numune boyu uzaması ile platenin birim zamanda deplasmanını koruyabilmesi için yük değerlerinde artış hızı yükselmektedir. Aynı geometri ve boyuta sahip numuneler için yükleme hızı artışı ile kırılma yükü ve ölçülen dayanım değerlerinde artış olmaktadır (Kömürlü, 2018; Kömürlü, 2019; Gong vd., 2019; Kohmura ve Inada, 2006). Bu durum boy/çap oranındaki artış ile geometri değişimi etkisinin minimize edilmesi için deformasyon kontrollü yükleme hızı kullanımına avantaj sağlamaktadır. Numune boyu ve kırılma yükleri birlikte incelendiğinde, deformasyon kontrollü testlerde numune boyu artışı ile ölçülen dayanım değerlerinde düşük seviyelerde azalma olduğu görülmüştür. Boy/çap oranının artışı ile yükleme hızı birimi seçimine bağlı olmaksızın dolaylı çekme dayanımı değerlerinde azalma olduğu, ancak yükleme hızının deformasyon kontrollü tercih edilmesi durumunda geometrik özelliklerin elde edilen sonuçlar üzerindeki etkilerinin önemli ölçüde giderilmiş olduğu görülmüştür. Kısaca, farklı geometrilere sahip karot numunelerinden benzer dolaylı çekme dayanımı değerleri elde etmek ve boy/çap oranının deney sonuçları üzerindeki etkilerini minimize edebilmek için testlerde deformasyon kontrollü yükleme hızı tercih edilmesi önerilmiştir.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

### Kaynakça (References)

- Akazawa, T., 1943. New test method for evaluating internal stress due to compression of concrete (the splitting tension test) (part 1). *Journal of Japan Society of Civil Engineering*, 29, 777-787.
- Aliha, M.R.M., 2014. Indirect tensile test assessments for rock materials using 3-D disc-type specimens. *Arabian Journal of Geosciences*, 7 (11), 4757-4766.
- ASTM D3967-16, 2016. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Carneiro, F.L.L.B., 1943. A new method to determine the tensile strength of concrete. *Proceedings of the 5th meeting of the Brazilian Association for Technical Rules*, September 1943, 126-129.
- Erarslan, N., Liang, Z.Z., Williams, D.J., 2012. Experimental and Numerical Studies on Determination of Indirect Tensile Strength of Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(5), 739-751.
- Fabjan, T., Ivars D.M., Vukadin, V., 2015. Numerical simulation of intact rock behaviour via the continuum and Voronoi tessellation models – a sensitivity analysis. *Acta Geotechnica Slovenica*, 12, 5-23.
- Fairbairn, E.M.R., Ulm, J.F., 2002. A Tribute to Fernando L. L. B. Carneiro (1913 - 2001) Engineer and Scientist who invented the Brazilian Test. *Materials and Structures*, 35, 195-196.
- Gong, F.Q., Zhao, G.F., 2014. Dynamic Indirect Tensile Strength of Sandstone under Different Loading Rates. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 2271-2278.
- Gong, F., Zhang, L., Wang, S., 2019. Loading Rate Effect of Rock Material with the Direct Tensile and Three Brazilian Disc Tests. *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, Article ID 6260351, 8 pages
- Guinea, G.V., Elices, M., Planas, J., 2000. Assessment of the tensile strength through size effect curves. *Engineering Fracture Mechanics*, 65, 189-207.
- Huafeng, D., Jianlin, L., Min, Z., Ruihong, W., Xianfan, Y., Qian, L., 2012. Research on effect of disc thickness-to-diameter ratio on splitting tensile strength of rock. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31, 792-798
- ISRM, 1978. International society for rock mechanics suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, 99-103.
- ISRM, 2007. The blue book - the complete ISRM suggested methods for rock characterisation, testing and monitoring: 1974-2006 (Ulusay R, Hudson JA in eds). ISRM & Turkish National Group of ISRM, Ankara
- Jianhong, Y., Wu, F.Q., Sun, J.Z., 2009. Estimation of the tensile elastic modulus using Brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 568-576.
- Kohmura, Y., Inada, Y., 2006. The Effect of the Loading Rate on Stress-Strain Characteristics of Tuff. *Journal of the Society of Materials Science Japan*, 55, 323-328.

- Komurlu, E., 2018. Loading Rate Conditions and Specimen Size Effect on Strength and Deformability of Rock Materials under Uniaxial Compression. *International Journal of Geo-Engineering*, 9, Paper no: 17, 1-11.
- Komurlu, E., 2019. An Experimental Study on Determination of Crack Propagation Energy of Rock Materials under Dynamic (Impact) and Static Loading Conditions. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 6, 1-6.
- Komurlu, E., Kesimal, A., 2012. Jaw Effects on Indirect Tensile Strength Test Disc Failure Mechanism. 7th Asian Rock Mechanics Symposium, October, Seoul, 624-637.
- Komurlu, E., Kesimal, A., 2015. Evaluation of Indirect Tensile Strength of Rocks using Different Types of Jaws. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 1723-1730.
- Komurlu, E., Kesimal, A., Demir, S., 2016. An Experimental and Numerical Study on Determination of Indirect (Splitting) Tensile Strength of Rocks under Various Load Apparatus. *Canadian Geotechnical Journal*, 53, 360-372.
- Kömürlü, E., Kesimal, A., 2017. Darbe Etkisi Altında Granit Türü Farklı Kaya Malzemelerinin Çatlak İlerleme Enerjisinin Belirlenmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma. *Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Geoteknik Sempozyumu 2017*, Ekim, Adana, 231-238.
- Kourkoulis, S.K., Markides, C.F., Chatzistergos, P.E., 2013. The standardized Brazilian disc test as a contact problem. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 57, 132-141.
- Li, X., Marasteanu, M.O., Williams R.C., 2007. The Effect of Loading Level and Rate in the Indirect Tensile Test. *Proceedings of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, Ames, Iowa,
- Lin, H., Xiong, W., Yan, Q., 2016. Three-Dimensional Effect of Tensile Strength in the Standard Brazilian Test Considering Contact Length. *Geotechnical Testing Journal*, 39 (1), 137-143.
- Markides, C.F., Kourkoulis, S.K., 2013. Naturally Accepted Boundary Conditions for the Brazilian Disc Test and the Corresponding Stress Field. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 959-980.
- Markides, C.F., Kourkoulis, S.K., 2016. The influence of jaw's curvature on the results of the Brazilian disc test. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 127-146.
- Markides, C.F., Pazis, D.N., Kourkoulis, S.K., 2010. Closed Full-Field Solutions for Stresses and Displacements in the Brazilian Disc under Distributed Radial Load. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 47 (2), 227-237.
- Xu, X., Wu, S., Gao, Y., Xu M., 2016. Effects of Micro-structure and Micro-parameters on Brazilian Tensile Strength Using Flat-Joint Model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49 (9), 3575-3595.
- Ye, J.H., Wu, F.Q., Zhang, Y., Ji, H.G., 2012. Estimation of the bi-modulus of materials through deformation measurement in a Brazilian disk test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 52, 122-131.
- Yu, M., Wei, C., Niu, L., 2017. The Coupled Effect of Loading Rate and Grain Size on Tensile Strength of Sandstones under Dynamic Disturbance. *Shock and Vibration*, Cilt. 2017, Article ID 6989043, 13 pages.
- Yu, Y., Yin, J., Zhong, Z., 2006. Shape effects in the Brazilian tensile strength test and a 3D FEM correction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 623-627



## İKİZ MERDANE YÖNTEMİ İLE 1XXX SERİSİ ALÜMİNYUM LEVHA ÜRETİMİNDEKİ PROSES PARAMETRELERİNİN ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Hediye AYDIN<sup>1\*</sup>, Remzi GÖREN<sup>1</sup>, N. Merve CENGİZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

<sup>2</sup>Canel Otomotiv İstanbul Cad. No:648, Ovaakça, Bursa, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Alüminyum Levha,  
İletkenlik,  
Tane Büyümesi.

### Öz

Bu çalışmada ikiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile üretilen 1xxx alaşımlarının alüminyum levha üretimi gerçekleştirilmiştir. 1xxx alaşımları ile üretilen alüminyum levhaların günümüz teknolojisinde üretimdeki proses parametreleri ve söz konusu parametrelerin nihai ürünlerin mekanik özellikleri ve elektriksel iletkenliği üzerinde etkilerinin neler olduğu araştırılmıştır. Çalışmada 1050 alaşımlı levha üretimi için 1310 mm genişliğinde, 5.50 mm kalınlığında sürekli döküm yöntemi tekniği kullanılarak levha üretimi gerçekleştirilmiştir. Döküm denemeleri TS EN 573-3 standardına göre yapılmıştır. Mekanik özelliklerin tespiti Zwick Z050 markalı çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Döküm içerisindeki alaşım elementlerinin (Si, Mn ve Ti) elektriksel iletkenliğe etkilerinin yanında soğuk haddeleme sonrasında, nihai tav denemeleri uygulanarak iletkenlikleri ölçülmüştür.

## THE INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON PROPERTIES IN 1XXX SERIES ALUMINUM SHEET PRODUCTION BY TWIN ROLLER METHOD

### Keywords

Aluminum Sheet,  
Conductivity,  
Grain Growth.

### Abstract

In this study, aluminum sheet production of 1xxx alloys produced by twin roll continuous casting technique was realized. In the current technology of aluminum sheets produced with 1xxx alloys, the parameters of the process in production, the parameters affecting the casting and the effects of these parameters on the mechanical properties and electrical conductivity of the final products were investigated. For the production of 1050 alloy plates, plate production was performed by using 1310 mm wide, 5,50 mm thick continuous casting technique. The casting tests were carried out according to TS EN 573-3 standard. Mechanical properties were determined by using Zwick Z050 tensile tester. In addition to the effects of alloying elements (Si, Mn and Ti) on the electrical conductivity of the cast, their conductivity was measured by applying the final annealing tests after cold rolling.

### Alıntı / Cite

Aydın, H., Gören, R., Cengiz, M., (2020). İkiz Merdane Yöntemi İle 1xxx Serisi Alüminyum Levha Üretimindeki Proses Parametrelerinin Özellikler Üzerindeki Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8 (1), 146-152.

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

H. Aydın, 0000-0003-2164-6129  
R. Gören, 0000-0003-2140-9211  
N.M. Cengiz, 0000-0002-0203-8593

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	14.01.2019
Revizyon Tarihi / Revision Date	06.08.2019
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.08.2019
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

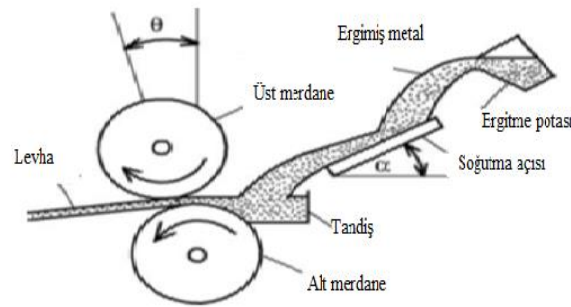
Oldukça geniş uygulama alanına sahip alüminyum ve alüminyum alaşımları ekonomik ve elverişli metalik malzemeler sınıfında yer almaktadır. Alüminyumun sahip olduğu çok yönlü karakteristiği, çelikten sonra ikinci sırada tercih edilen metal olmasını sağlamaktadır. Genellikle folyo ve iletken kablo üretiminde yaygın kullanım alanına sahip saf alüminyum sünek, korozyona dayanıklı ve yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir. Farklı üretim

\* İlgili yazar / Corresponding author: hediye.aydin@dpu.edu.tr, +90-274-265-2031 / 4272

yöntemleri kullanılarak yüksek mukavemetli alüminyum ürünler elde edebilmek için alaşım elementleri takviye edilmektedir (Cengiz, 2018; Davis, 2001).

Alüminyum alaşımları iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle elektrik-elektronik sektörlerinde yer altı kabloları, trafo koruyucuları, şaseler, elektrik boruları ve birçok alanda; hafifliği, estetik oluşu ve mukavemetinin yüksek olmasından dolayı inşaat sektöründe kapı ve pencerelerde, çatı ve cephe kaplamalarında (Kaufman and Rooy, 2004) ve yine hafif oluşu sayesinde meşrubat, konserve kutuları ve kapaklarının da ambalajlanması için tercih edilmektedir (Marsh ve Bugusu, 2007). 1xxx serisi, % 99.00 veya daha yüksek alüminyum saflığına sahip alaşımlardır. Özellikle elektrik ve kimya alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 1xxx serisi, mükemmel korozyon direnci, yüksek termal ve elektrik iletkenlikleri, düşük mekanik özellikler ve mükemmel işlenebilirlik ile karakterize edilmektedir (Davis, 2001). Saf alüminyum sınıfında yer alan 1050 alaşımları, derin çekilebilir malzemelerde, elektrik kaplamalarında ve ısı yalıtım cephelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Cengiz, 2018; Emley, 1976).

Yüksek mukavemet/ağırlık oranına, düşük maliyete ve yüksek aşınma direncine sahip oluşundan dolayı alüminyum alaşımları hem havacılık ve otomotiv sektöründe hem de birçok yapısal amaçlı uygulamalarda tercih edilen malzemelerden biridir. Ancak şunu da unutmamak gerekir ki çoğu Al alaşımını üretmek için hem basit hem de ekonomik yöntemler söz konusu alaşımların uygulamalarının daha da genişletilmesi için bir zorunluluktur (Stojanovic vd, 2018).



**Şekil 1.** Yatay ikiz merdaneli döküm işleminin şematik gösterimi (Schematic representation of horizontal twin roll casting process)(Watari vd., 2007).

İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemi, alüminyum endüstrisinde kullanılan yassı haddelenmiş ürünlerin önemli bir bölümünü üretebilmek için geliştirilmiştir. Sürekli döküm teknolojilerinin söz konusu sektörde sağladığı büyük avantaj, geleneksel teknolojilere kıyasla levha ve rulo üretiminde çeşitli üretim adımlarından tasarruf edilmesidir. Nihai ürün şekline daha yakın net şekilli ürünlerin üretilebildiği sürekli döküm yöntemi genellikle yüksek sermaye maliyeti gerektirirken aynı zamanda düşük bir işletme maliyetine sahiptir (Yun vd., 2000; Kopeliovich vd, 2001; Barekar vd, 2014). Dolayısıyla daha az deformasyona ve mekanik işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da sürekli döküm işlemine alternatif süreçlere göre enerji ve maliyet avantajı sağlamaktadır (Cook vd., 1995: 76-94; Watari vd., 2007; Sanders, 2012: 291-299; Ahmed M.I, 2017).

Sunulan çalışmada ikiz merdaneli sürekli döküm yöntemi ile üretilen 1050 alaşımlı alüminyum levhaların üretim sürecindeki parametreler ve bu parametrelerin söz konusu levhaların mekanik ve elektriksel iletkenlik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışma ile sürekli döküm yöntemi ile üretilen alüminyum levhaların üstün olan yanlarını vurgulamanın yanı sıra bu yöntem ile üretilen levhaların üretim sürecindeki parametrelerin eksiklikleri ya da yapılan hataları iyileştirerek daha düşük maliyetli üretimle endüstriyel alanda üretim potansiyelini artırma hedeflenmiştir.

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

Yapılan deneylerde 1050 alaşımların dökümleri TS EN 573-3 standartlarında gerçekleştirilmiştir. Tablo 1'de çalışmalar için üretilen 1050 alaşımlarının döküm ortamı ve özellikleri verilmiştir. Döküm hattından alınan numunelerin kimyasal analizlerini belirlemek için Bruker Qantro marka spektrometre cihazı kullanılmıştır. 1310 mm genişliğinde ve 5,50 mm kalınlığındaki numuneler soğuk haddeme hattında 3 adımdan geçerek 2,20 mm, 2,00 mm ve 1,90 mm kalınlığına getirilmiştir.

1,90 mm kalınlığındaki alaşımlar 397, 400, 404, 415, 416 ve 421 °C sıcaklıkta; 2 mm kalınlığındaki alaşımlar 363, 378, 392, 395, 398 ve 402 °C sıcaklıkta; 2,20 mm kalınlığındaki alaşımlar ise 382 ve 417 °C sıcaklıkta 4 saat süre ile tavlansmıştır. Tav denemeleri için Protherm marka kül fırını HLF50 (0-1050°C) kullanılmıştır. Tavlama

işleminden sonra yukarıda bahsedildiği gibi 3 ayrı kalınlıktan alınan 14 adet farklı numunenin sıcaklıkları oda sıcaklığına getirilerek elektriksel iletkenlikleri Helmut Fischer GmbH markalı cihaz kullanılarak, DIN EN 2004-1 ve ASTM E 1004'e göre ayarlanan uluslararası ölçüm standartları (mS/m) cinsinden hassas elektriksel iletkenlik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Cihazın ucundaki prob yardımı ile alüminyum doğrulama numunesinde doğrulandıktan sonra oda sıcaklığında her numune için farklı noktalardan 5 kez ölçüm alınıp, ortalama değerleri baz alınmıştır.

1050 alaşımlarından alınan numunelerin mekanik karakterizasyonu TS EN 485-2 standartlarına uygun olacak şekilde Zwick Z050 marka uzama ölçer (ekstensometreli) çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir ve % uzama miktarlarını belirlemek için ise çekme testleri uygulanmıştır. Döküm yönünden dik kesit halinde alınan numuneler giyotin tipi makas yardımı ile kesilip, uzamanın kolay tespit edilebilmesi için numuneler orta bölgesinden inceltirilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin inceltirilmiş kısımları ortalanarak çekme cihazına yerleştirilerek ölçümleri yapılmıştır.

**Tablo 1.** Alaşımların döküm ortamı ve özellikleri (Casting environment and properties of alloys)

Alaşım	Su giriş-çıkış sıcaklığı (°C)	Tip ve Merdane Merkezi Aralığı (TMA, mm)	Tandış sıcaklığı (°C)	Merdane çapı Ø (mm)	Döküm hızı (cm / dk)	Merdane bombesi (µm)
1050	37-41	46	700	629,00	140	0,28

### 3. Bulgular ve Tartışma (Findings and discussion)

#### 3.1. 1050 Alaşımlı Malzemelerin Döküm Analizleri (Casting Analysis of 1050 Alloy Materials)

1050 - H0 alaşımlı 1,90 mm, 2 mm ve 2,2 mm kalınlığından alınan farklı numunelerin spektrometre analiz sonuçları sırasıyla Tablo 2-4'de verilmiştir. Söz konusu tablolardan 1050 serisi alaşımlarda alüminyum oranının oldukça yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.

**Tablo 2.** 1050 - H0 alaşımlı 1,90 mm kalınlığındaki farklı numunelerinin spektrometre analiz sonuçları (Spectrometer analysis results of different samples of 1050-H0 alloy 1,90 mm thickness)

Kimyasal bileşimleri, (% ağırlık)													
No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Zr	Al
1	0,127	0,261	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,003	0,012	0,011	0,007	0,000	99,573
2	0,119	0,206	0,001	0,004	0,002	0,001	0,006	0,008	0,011	0,009	0,014	0,001	99,618
3	0,121	0,256	0,001	0,010	0,003	0,001	0,006	0,002	0,013	0,011	0,008	0,001	99,568
4	0,124	0,263	0,000	0,019	0,010	0,000	0,006	0,003	0,015	0,010	0,006	0,000	99,544
5	0,115	0,244	0,001	0,028	0,008	0,000	0,006	0,007	0,020	0,010	0,010	0,000	99,551
6	0,128	0,266	0,001	0,019	0,013	0,001	0,006	0,002	0,023	0,011	0,008	0,001	99,521

**Tablo 3.** 1050 - H0 alaşımlı 2,00 mm kalınlığındaki farklı numunelerinin spektrometre analiz sonuçları (Spectrometer analysis results of different samples of 1050-H0 alloy 2,00 mm thickness)

Kimyasal bileşimleri, (% ağırlık)													
No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Zr	Al
1	0,116	0,238	0,000	0,000	0,005	0,000	0,005	0,008	0,013	0,010	0,009	0,000	99,596
2	0,117	0,234	0,000	0,011	0,004	0,000	0,007	0,005	0,010	0,009	0,008	0,000	99,592
3	0,125	0,247	0,001	0,009	0,000	0,001	0,006	0,004	0,010	0,009	0,012	0,001	99,575
4	0,111	0,273	0,000	0,031	0,011	0,000	0,006	0,026	0,021	0,018	0,011	0,000	99,492
5	0,137	0,243	0,001	0,013	0,000	0,001	0,005	0,014	0,018	0,011	0,013	0,001	99,543
6	0,128	0,230	0,000	0,007	0,021	0,000	0,006	0,005	0,012	0,010	0,011	0,000	99,570



**Tablo 4.** 1050 – H0 alaşımlı 2,20 mm kalınlığındaki numunelerinin spektrometre analiz sonuçları (Spectrometer analysis results of different samples of 1050-H0 alloy 2,20 mm thickness)

Kimyasal bileşimleri, (% ağırlık)													
No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Zr	Al
1	0,103	0,206	0,000	0,013	0,007	0,000	0,007	0,011	0,013	0,012	0,009	0,000	99,619
2	0,114	0,227	0,000	0,026	0,003	0,000	0,006	0,010	0,019	0,011	0,010	0,000	99,574

### 3.2. 1050 Alaşımlı Malzemelerin Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of 1050 Alloy Materials)

1050 – H0 alaşımının 1,90 mm, 2 mm ve 2,2 mm kalınlığından alınan farklı numunelerin çekme ve akma mukavemetlerinin (MPa), % uzama sonuçları sırasıyla Tablo 5-7'de verilmiştir. Buna göre tüm numunelerde tavlama sıcaklığının artmasıyla çekme ve akma mukavemetlerinin azaldığı, % uzama değerlerinin arttığı gözlenmektedir (Davis, 2001).

**Tablo 5.** 1050 – H0 alaşımlı 1,90 mm kalınlığındaki farklı numunelerinin çekme-akma mukavemetlerinin (MPa) sonuçları, % uzama sonuçları (Tensile-yield strength (MPa) results of different samples of 1050-H0 alloy 1,90 mm thickness, elongation results)

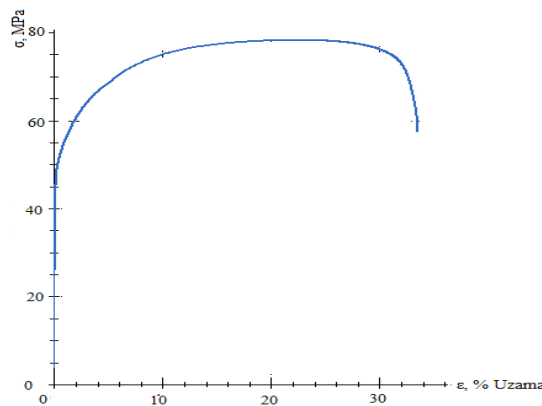
No	Tav sıcaklığı (°C)	Rm (MPa) Çekme Dayanımı	Rp <sub>0,2</sub> (MPa) Akma Dayanımı	% uzama
1	397	75,46	43,73	31,88
2	400	75,08	43,65	40,10
3	404	74,09	43,25	40,34
4	415	73,46	42,43	40,71
5	416	72,65	42,40	42,63
6	421	68,06	41,15	43,13

**Tablo 6.** 1050 – H0 alaşımı 2 mm kalınlığındaki farklı numunelerinin çekme-akma mukavemetleri (MPa), % uzama sonuçları (Tensile-yield strength (MPa) results of different samples of 1050-H0 alloy 2 mm thickness, elongation results)

No	Tav sıcaklığı (°C)	Rm (MPa) Çekme Dayanımı	Rp <sub>0,2</sub> (MPa) Akma Dayanımı	% uzama
1	363	78,69	50,08	29,11
2	378	77,19	48,87	30,40
3	392	76,54	43,89	36,35
4	395	75,80	41,68	38,45
5	398	71,43	41,37	40,89
6	402	70,67	40,01	43,11

**Tablo 7.** 1050 – H0 alaşımlı 2,20 mm kalınlığındaki farklı numunelerinin çekme-akma mukavemetleri (MPa), % uzama sonuçları (Tensile-yield strength (MPa) results of different samples of 1050-H0 alloy 2,20 thickness, elongation results)

No	Tav sıcaklığı (°C)	Rm (MPa) Çekme Dayanımı	Rp <sub>0,2</sub> (MPa) Akma Dayanımı	% uzama
1	382	74,44	43,68	39,87
2	417	73,22	42,72	40,26

**Şekil 2.** Gerilme-gerinim eğrisi (Stress-strain curve)

Şekil 2’de örnek olarak çekme cihazından alınan gerilme-gerinim eğrisi verilmiştir. Bu eğri Tablo 6’da verilen 1050 alaşımlı ikinci numuneye aittir. Grafikte akma dayanımı (48,87 MPa) üzerine çıktığında plastik şekil değişimi gerçekleşmeye başlamıştır. Numune bir yandan uzarken, diğer yandan numunenin kesit alanı daralmaktadır. En yüksek tepe noktası çekme dayanımı (77,19 MPa) olduğu yerdir. Yük tepe noktasında ulaşıldıktan sonra düzgün uzama göstermemektedir. Teoride plastik kararsızlık olarak adlandırılan bu durum sadece numunede boyun veren kısımda uzamaya devam ettirmektedir. Uzama boyun kısmına hapsoldükten sonra kopma gerçekleşmektedir (Mühendishane, 2018; Cengiz, 2018).

### 3.3.1050 Alaşımlı Malzemelerin Tav Sıcaklıkları ve Elektriksel İletkenliklerinin İncelenmesi (Investigation of Annealing Temperatures and Electrical Conductivity of 1050 Alloy Materials)

Tablo 8’de 1050 – H0 alaşımlı 1,90 mm kalınlığındaki ayrı numunelerin farklı tavlama sıcaklıkları (4 saat) sıcaklıkları ve elektriksel iletkenlik (mS/m) sonuçları verilmiştir. Tablo 2’de gözlemlendiği gibi alüminyum saflık derecesi artıkça iletkenlik artmaktadır. Aynı zamanda Mangan (Mn) ve Tibor (Al5Ti1B) oranının % miktarındaki artışın elektriksel iletkenliği olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir (Cengiz, 2018).

Tablo 9’da 1050 – H0 alaşımlı 2,00 mm kalınlığındaki ayrı numunelerin farklı tavlama sıcaklıkları (4 saat) sıcaklıkları ve elektriksel iletkenlik (mS/m) sonuçları verilmiştir. Buna göre sıcaklığın belli bir değere göre elektriksel iletkenliği arttırdığı düşünülmektedir (Prasad, et al., 1998; Kaya, 2012). Tablo 10’da 1050 – H0 alaşımlı 2,20 mm kalınlığındaki ayrı numunelerin farklı tavlama sıcaklıkları (4 saat) sıcaklıkları ve elektriksel iletkenlik (mS/m) sonuçları verilmiştir. Tablo 8 ve Tablo 9’daki gibi elektriksel iletkenliğin sıcaklık parametresinin yanında Tablo 3’deki spektrometre analiz sonucundaki alaşım değerlerindeki etki edebileceği düşünülmektedir (Robinson and Dorn, 1951; Xu vd., 2018; Cengiz, 2018).

**Tablo 8.** 1050 – H0 alaşımlı 1,90 mm kalınlığındaki ayrı numunelerin farklı tavlama sıcaklıkları (4 saat) ve elektriksel iletkenlik (mS/m) sonuçları (Different annealing temperatures (4 hours) and electrical conductivity (mS/m) results of each samples of 1050-H0 alloy 1,90 mm thickness)

No	Tav sıcaklığı (°C)	İletkenlik (mS/m)
1	397	35,3
2	400	35,5
3	404	35,2
4	415	35,0
5	416	34,7
6	421	34,1

**Tablo 9.** 1050 – H0 alaşımlı 2 mm kalınlığındaki ayrı numunelerin farklı tavlama sıcaklıkları (4 saat) sıcaklıkları ve elektriksel iletkenlik (mS/m) sonuçları (Different annealing temperatures (4 hours) and electrical conductivity (mS/m) results of each samples of 1050-H0 alloy 2 mm thickness)

No	Tav sıcaklığı (°C)	İletkenlik (mS/m)
1	363	35,0
2	378	35,5
3	392	35,7
4	395	34,1
5	398	34,5
6	402	34,6

**Tablo 10.** 1050 – H0 alaşımlı 2,20 mm kalınlığındaki ayrı numunelerin farklı tavlama sıcaklıkları (4 saat) sıcaklıkları ve elektriksel iletkenlik (mS/m) sonuçları (Different annealing temperatures (4 hours) and electrical conductivity (mS/m) results of each samples of 1050-H0 alloy 2,20 mm thickness)

No	Tav sıcaklığı (°C)	İletkenlik (mS/m)
1	382	35,1
2	417	34,6

Yapılan deneyler sonucu 1050- H0 alaşımlarının döküm içerisindeki mangan oranı % 0,10, Tibor (AlTi5B1) oranının ise % 0,13’den büyük olduğunda levhanın elektriksel iletkenliğini olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir (Cengiz, 2018). Döküm alaşım oranlarının yanında elektrik iletkenliğine etki eden diğer bir önemli faktör ise sıcaklıktır (Kaya, 2012). 1050 alaşımlı alüminyumlu levhaların tavlama sıcaklıkları 390-400 °C’ye kadar elektrik iletkenliği artarken, 400 °C’den sonraki tavlama sıcaklıklarında ise elektrik iletkenliği düşmüştür. Soğuk haddelemeden çıkan levhaların elektriksel iletkenlikleri, ısı işlemlerden sonra ölçülen elektriksel iletkenlikler ile karşılaştırıldığında her bir numune için yaklaşık 3 mS/m daha düşük olduğu görülmüştür (Cengiz, 2018).

#### 4. Sonuçlar (Results)

İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemi ile üretilen 1050 levhaların döküm için yapılan tüm deneylerin sonuçlarını özetlersek; 1050 – H0 alaşımlı alüminyum levha, döküm hattında 1310 mm genişliğinde, 5,50 mm kalınlığında sürekli döküm yöntemi ile üretilmiştir. Soğuk haddeleme işlemi ile 3 adımdan geçerek 1,90 mm, 2,00 mm ve 2,20 mm kalınlıkta nihai ürün şeklini alan 14 adet farklı numune sonuçları incelenmiştir.

Yapılan deneylerde 1050 alaşımlı levhaların tavlama süresi sabit tutularak, sıcaklık arttırıldığında akma ve çekme mukavemetlerinin azaldığı ve % uzama miktarlarının arttığı gözlemlenmiştir. Sürekli döküm yönteminde üretilen levhalarda tavlama sıcaklığı arttıka ürünlerde yumuşamaya neden olarak kondsyonlarını düşürmektedir. Bunun nedeninin artan sıcaklıkla birlikte dislokasyonlar hareketlenerek malzemenin çekme ve akma mukavemetini azalttığı ve % uzama değerini arttırdığı olarak düşünülmektedir (Hwang, Monteiro et al., 2012). Bir başka deyişle sıcaklığın artmasıyla levha malzemelerin bir yandan snekleşirken bir yandan da mukavemetini kaybetmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde de tavlama sıcaklıkları ve sürelerine göre malzemelerin mekanik özellikleri değişkenlik gösterdiği grlmştir. Sabit sıcaklıkta, tavlama süresi arttıka, malzemelerde mukavemetin azaldığı grlmştir (Demiray, 2016; Tairu et al., 2014).

Yapılan çalışmada soğuk haddelemeden sonraki levhalarda kalınlık miktarının azalmasıyla birlikte çekme ve akma mukavemet değerlerindeki artışa bağlı olarak, % uzama miktarında azalma gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin ise iç yapı kusurları ve malzemede meydana gelen dislokasyon yoğunluğu olduğu düşünülmektedir (Demiray, 2016; Akdoğan vd., 2019).

Sürekli döküm yöntemi ile üretilen 1050 alaşımlı alüminyum levhaların içeriğinde bulunan Tibor (AlTi5B1) ilavesi akışkanlığı azaltırken, çekme mukavemetini arttırmaktadır (Zeren, 2008). Tablo 8-10'da verildiği üzere alaşımlı malzemelerin tavlama sıcaklıkları ve elektriksel iletkenlik ölümleri incelendiğinde elektriksel iletkenliğin kalınlığa ve alaşım miktarına da bağlı olarak tavlama sıcaklığının 390-400 C'ye kadar arttığı, fakat sıcaklığın daha da artmasıyla birlikte elektriksel iletkenliğin azaldığı grlmştir. Döküm içerisindeki yüksek oranda silisyum (Si), mangan (Mn) ve Tibor (AlTi5B1) alaşımlarının varlığının elektrik iletkenliğini azalttığı gözlemlenmiştir. Alüminyumun elektriksel iletkenliği sağlığına ve şayet içeriyorsa da safsızlıkların durumuna bağlıdır (Xu vd., 2018). Örneğin saf metallerin alaşımlandırılmasıyla beraber yapılarında gerilme veya okelme sertleşmesi olayı nedeniyle elektrik iletkenliği oldukça azalmaktadır (Murashkin vd., 2015). Safsızlıkların istenilen oranda düşük olması yüksek iletkenliğe sebep olabilmektedir. Diğer taraftan, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için mikro-alaşımlama kaçınılmazdır (Xu vd., 2018). 1050 alaşımlarında elektriksel iletkenliğin artması için döküm analizlerinde Tibor (AlTi5B1) oranın % 0,13'den, Mangan oranın ise % 0,10'dan fazla miktarda olmaması gerektiği kanaatine varılmıştır.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu alışma Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında 2018 yılı itibariyle tamamlanmış 'İkiz Merdane Yöntemi ile 1xxx Serisi ve 3xxx Serisi Alüminyum Levha retimindeki Proses Parametrelerinin zellikler zerindeki Etkisi' adlı bir yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır.

Bize bu çalışmada yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarında destek olan P.M.S. Alüminyum (Bursa) ailesine ve yaptıkları değerlendirmeler ile makalenin gelişimine katkı sağlayan değerli hakemlere teşekkür ederiz.

#### ıkar atışması (Conflict of Interest)

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

#### 5. Kaynaklar (References)

- Akdoğan, V.U., Iksaan, C., Mollaoğlu Altuner, H., Birbaşar, O., Gnyz, M., 2019. Influence of Strip Thickness on As-Cast Material Properties of Twin Roll Cast Aluminum Alloys, Light Metals, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7\\_139](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_139)
- Ahmed, M.I, 2017. Increasing of Aluminum Continuous Casting Line Production Quality via Improvement of the Control of Technological Parameters, Journ. Of Chemical Technology and Metallurgy, 52, 2, 235-241.
- Barekar, N.S, Dhindaw, B.K., 2014. Twin roll-casting of Al Alloys- An Overview, Materials and Manufacturing Processes, 29:651-661.
- Cengiz, N.M., 2018. İkiz Merdane Yöntemi İle 1xxx Serisi Ve 3xxx Serisi Alüminyum Levha retimindeki Proses Parametrelerinin zellikler zerindeki Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye.
- Cook, R., Grocock, P.G., Thomas, P.M., Edmonds, D.V., Hunt, J.D., 1995. Development of the twin-roll casting process, Malzeme İşleme Teknolojisi Dergisi, 55, 76-84.

- Demiray, Y., 2016. İkiz Merdane Döküm Yöntemi ile Alüminyum AA5754 Alaşımı Levha Üretimi, Döküm ve Termomekanik Proses Parametrelerinin etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Davis, J.R., 2001. Aluminum and Aluminum Alloys Alloying: Understanding the Basics. (Birinci Baskı). Ohio: ASM international, 371-441.
- Emley, E.F., 1976. Continuous casting of aluminum, International Metals Reviews, 75-115, Published online: 18 July 2013, <https://doi.org/10.1179/imtr.1976.21.1.75>
- Hwang, J.Y., Monteiro, S.N., et al., 2012. Characterization of Minerals, Metals and Materials, TMS 2012 Annual Meeting&Exhibition, Orlando, Florida, USA, pp. 514-515.
- Kaufman, J.G., Rooy, E.L., 2004. Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications, ASM International, ISBN: 978-0-87170-803-8, 272-282.
- Kaya, H., 2012. Dependence of electrical resistivity on temperature and composition of Al-Cu alloys, Materials Research Innovation, 16, 3, 224-229.
- Kopeliovich, D., Shapiro, A., Shagal, V., 2001. Aluminum bismuth bearing alloy and methods for its continuous casting.
- Marsh, K., Bugusu, B., 2007. Food packaging roles, materials, and environmental issues, 72(3), 39-55.
- Murashkin, M., Medvedev, A., Kazykhanov, V., Krokhin, A., Raab, G., Enikeev, N and Valiev, R.Z., 2015. Enhanced Mechanical Properties and Electrical Conductivity in Ultrafine-Grained Al 6101 Alloy Processed via ECAP-Conform, Metals 2015, 5, 2148-2164; doi:10.3390/met5042148
- Prasad, P.N., Mark, J.E., et al., 1998. Science and technology of polymers and advanced materials. Springer Science Business Media, LLC. 414-415.
- Robinson, A.T., Dorn, J.E., 1951. Effect of Alloying Elements on the Electrical Resistivity of Aluminum Alloys, Journal of the Minerals, Metals & Materials Society 3(6), DOI: 10.1007/BF03397330.
- Sanders, R.E., 2012. Continuous Casting for Aluminum Sheet a Product Perspective, 64(2), 291-299.
- Stojanovic, B., Milan, B., Epler, I., 2018. Application of Aluminum and Aluminum Alloys in Engineering. 3. 10.18485/aeletters.2018.3.2.2.
- Tairu, Onawale & Aiyedun, P & Tairu, O.T.. 2014. Relationship between Yield stress and yield Strength on Various Grade of steel Being Hot rolled. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 11. 40-46. 10.9790/1684-11114046.
- Xu, X., Feng, Y., Yang, P., Zhang, B., Wang, Y., Wang, Q., Fan, X., Ding, H., 2018. The influence of trace elements on the microstructures and properties of the aluminum conductors, Results in Physics, 11, 1058-1063.
- Watari, H., Hagab, T., Kogac, N., Daveyd, K., 2007. Feasibility study of twin roll casting process for magnesium alloys, Malzeme İşleme Teknolojisi Dergisi, 192-193, 300-305.
- Yun, M., Lokyer, S., Hunt, J.D., 2000. Twin Roll Casting of Al Alloys, Materials Science and Engineering A 280(1):116-123.
- Zeren, M., 2008. Demir Dışı Düşük Sıcaklık ve Alaşımları Ders Notları, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.  
<https://muhendishane.org/derslik/mekanik-dersleri/gerilim-ve-gerinim/> (Erişim tarihi 22.04.2018).



## PÜSKÜRTME BETONUN YAKLAŞIK MALİYET ANALİZİ İÇİN UYGULAMA GELİŞTİRİLMESİ

Melda ALKAN ÇAKIROĞLU<sup>1\*</sup>, Ahmet Ali SÜZEN<sup>2</sup>, İlkenur ŞENTÜRK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Uluborlu Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Isparta, Türkiye.

<sup>3</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi ABD, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Püskürtme Beton, Maliyet Hesabı, Yaklaşık Maliyet, Yazılım Geliştirme, Microsoft C#</i>	Püskürtme beton depremden hasar görmüş binaların onarım/güçlendirilmesinin yanı sıra metro, baraj, köprü, tünel yapım ve onarımı, şev stabilizasyonları gibi bir çok uygulama alanına sahip olması bakımından karışım tasarımı, uygulanması, makine teçhizat, geri sıçrama vb. faktörlerin maliyete olan etkisinin incelenmesi en önemli olgudur. Püskürtme betonun maliyetine; uygulanma yüzeyi, malzeme kalitesi, geri sekme, işçilik, nakliye vb. gibi birçok faktör etki etmektedir. Bu nedenle maliyeti kesin olarak tayin etmek mümkün değildir. Bu çalışmada püskürtme betonun farklı uygulama ve amaçları için yaklaşık maliyetinin hesaplanması amaçlanmıştır. Püskürtme betonun maliyetini etkileyen parametrelerin maliyete olan etkisini değerlendirebilmek için geliştirilen yazılım, Microsoft Visual Studio platformunda C# programlama dili ile geliştirilmiştir. Yazılımdan analiz edilerek ortaya çıkan veriler, örnek bir çalışma ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak geliştirilen yazılımında yapılan testlerin, örnekle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

## DEVELOPING AN APPLICATION FOR APPROXIMATE COST ANALYSIS OF SHOTCRETE

Keywords	Abstract
<i>Shotcrete, Cost Estimate, Approximate Cost, Application Developing, Microsoft C#.</i>	Shotcrete has many application areas such as repair/reinforcement of buildings damaged by an earthquake as well as metro, dam, bridge, tunnel construction and repair, slope stabilization so it's important to investigate the effects of certain factors, including mixture design, application, machinery and equipment, rebound on cost. The cost of shotcrete is affected by several factors such as the application surface, material quality, rebound, workmanship, transport, etc. Therefore, it is not possible to determine the exact cost. The aim of this study is to calculate the approximate cost of shotcrete for different applications and purposes. The software developed to evaluate the effects of the parameters affecting the cost of shotcrete was developed using C# programming language on Microsoft Visual Studio platform. Data obtained by analyzing on the software were compared with a sample study. As a result, it was determined that the tests performed in the developed software were in agreement with the sample.

### Alıntı / Cite

Çakıroğlu, M. A., Süzen, A.A., Şentürk, İ., (2020). Püskürtme Betonun Yaklaşık Maliyet Analizi için Uygulama Geliştirilmesi, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(1), 153-164.

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

M. Alkan Çakıroğlu, 0000-0002-8919-6278

A.A. Süzen, 0000-0002-5871-1652

İ. Şentürk, 0000-0001-9376-8243

### Makale Süreci / Article Process

**Başvuru Tarihi / Submission Date** 08.05.2019

**Revizyon Tarihi / Revision Date** 05.08.2019

**Kabul Tarihi / Accepted Date** 19.08.2019

**Yayın Tarihi / Published Date** 20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Günümüzde insan hayatının ayrılmaz bir parçası haline gelen ve günlük hayatın her alanında etkisini gösteren bilgisayar, hızlı gelişen teknoloji sayesinde bilime daha çok yardımcı olmaktadır. Bilim bilgisayar geliştirirken, aynı

\* İlgili yazar / Corresponding author: meldaalkan@isparta.edu.tr, +90-246-214-6808

anda bilgisayar da bilimle senkronize çalışmakta ve bilimsel çalışmaları kolaylaştırmaktadır (Özgür ve İleri, 2002). Günümüzde tüm mühendislik disiplinleri, gerek proje gerekse üretim aşamasında bilgisayar programlarından yararlanmaktadır (Özgür, 2004). İnşaat sektörü uygulamalarında her geçen gün daha karmaşık ve büyük boyutlu projeler gündeme gelmektedir. İşletmeler arasında giderek artan rekabet, bu karmaşık projelerin sadece performansları açısından değil, süre ve maliyet açısından da değerlendirilmelerini zorunlu kılmaktadır (Kırankaya, 2007). İnşaat sektöründe uygulama alanına sahip püskürtme betonun yaklaşık maliyet hesabının üzerinde dikkatle durulması gereken önemli bir olgudur. Maliyet faktörü düşünülmeden püskürtme betonun üretim ve uygulamasını planlamak mümkün değildir.

Bu çalışmada püskürtme betonun yaklaşık maliyetini hesaplamak amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı İnşaat Birim Fiyat Analizlerinden yararlanılarak, Microsoft C# program dili kullanılarak bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Microsoft C# dili nesne tabanlı bir dil olması ve grafiksel kullanıcı arayüzü geliştirme gibi özelliklere sahip olmasından dolayı tercih edilmiştir. Programda püskürtme betonun kullanım amacı, betonun yerleşimi, işçilik ve çevre faktörleri ve geri sıçrama miktarının maliyete olan etkileri göz önüne alınmıştır.

Ekonominin önde gelen sektörlerinden biri olan inşaat sektöründe kritik bir faktör olan maliyet ve bu maliyeti etkileyen faktörlerin tespiti, bu konunun önemini arttırmaktadır. Bu nedenle araştırmada yapı maliyetinin hesaplanması ve yaklaşık maliyet yöntemleri konuları ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar arasından bazıları; püskürtme beton ve geri sıçrama miktarının püskürtme beton maliyetine etkisi (Arioğlu vd., 2008), ahşap tahkimat sistemi ile püskürtme beton ve çelik telli püskürtme beton sistemlerinin maliyetlerinin karşılaştırılması (Yüksek vd., 2004), püskürtme beton operatörleri için simülasyon programı (Börjesson ve Thell 2009), yaş karışım püskürtme betonda çelik lif kullanımının maliyete etkisi (Ayış, 2010), kuru karışım püskürtme beton karışım hesabının bilgisayar ortamında hazırlanması (Çakıroğlu, 2014), maliyet analizi (Altın ve Allahverdi, 2004; Kani ve Baykan, 2004; Bostancıoğlu, 2006; Uğur, 2007; Kuruoğlu, vd., 2012; Klakegg ve Lichtenberg, 2016; Bayraktar ve Bayraktar, 2016), yapay zeka ve yapay sinir ağları (Günaydın ve Doğan; 2004; Juszczak, 2017), PERT-CPM tekniği (Dziadosz, 2013; Karahan ve Ezin, 2014), yapı bilgi modellemesi (Yaman ve İlhan, 2010; Lee, vd., 2014; Gerçek vd., 2016; Wang, vd., 2016; Abanda vd., 2017; Beşer, 2017), yapay arı koloni algoritması (Tapao ve Cheerarot, 2017; Dağdeviren ve Kaymak, 2018), onarım/güçlendirme maliyetleri (Doğramacı vd., 2003; Yanmaz ve Luş, 2005) üzerine yapılmış çalışmalardır. Ancak püskürtme betonun yazılım tabanlı maliyet analizi hakkında yapılmış bir literatür çalışmasına rastlanılamamıştır. Bu nedenle bu çalışmanın yeni çalışma alanlarının belirlenmesine fayda sağlayabileceği söylenebilir.

Püskürtme betonun maliyetinin mümkün olduğunca gerçeğe yakın bir şekilde hesaplanması kullanıcı için önem arz etmektedir. Ancak bu hem zaman alan hem de yanılma olasılığı oldukça yüksek olan bir işdir. Bu çalışmada, farklı uygulamalar için üretimi yapılacak püskürtme betonun yaklaşık maliyetini hesaplamaya yönelik bir bilgisayar uygulaması geliştirilmiştir.

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

Hazırlanan programda püskürtme betonun; hammaddeleri, uygulanma şekli, kullanım yerleri, teknik özellikleri, geri sekmesi gibi püskürtme betonun maliyet unsurlarını ve teknik farklılıklarını hesaba katan ve işleyen bir uygulama tasarlanmıştır. Çalışmanın gerçekleştirildiği uygulama Microsoft Visual Studio. NET 2017 platformunda C# 6.0 programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir.

Uygulama tasarımı bölümünde Kullanımı Amacı (Şekil 1-a), Karışım Türü (Şekil 1-b), Çevresel Koşullar (Şekil 1-c), Beton ve Katkı (Şekil 1-d), Çelik Hasır (Şekil 1-e) isimli 5 menüden oluşmaktadır. Bu beş menüde kendi aralarında alt menülere ayrılmaktadır. Kullanım amacı menüsünde püskürtme betonun uygulanma amacına göre giriş verisi, menü de yer alan seçeneklerden tespit edilmektedir. Karışım türü menüsünden uygulama yapılacak püskürtme betonun karışım türü ekranda yer alan menüden seçim yapılır.

**Şekil 1.** Uygulamaya ait menülerin tasarımı, (a) Kullanımı Amacı, (b) Karışım Türü, (c) Çevresel Koşullar, (d) Beton Katkı, (e) Çelik Hasır (Design of application menus, (a) purpose of use, (b) type of mixture, (c) environmental conditions, (d) concrete additive, (e) steel mesh)

Program içerisinde detaylı bir kullanım kılavuzu yer almaktadır. Programın uluslararası düzeyde kullanımın sağlanabilmesi için Türkçe ve İngilizce dil seçenekleri de bulunmaktadır. Programa veri girişi sırasında ara ara çalışmanın durumunu kaydetmek, sonuçları saklamak veya başka bir bilgisayara aktarabilmek için kaydet ikonu, yazıcıdan sonuçların alınabilmesi için de yazıcıdan çıktı alma seçeneği eklenmiştir. Programda ilave olarak her aktif ekranın alt kısmında kullanıcıya yönelik genel bilgilere de yer verilmiştir.

Programda, işçilik ve operatör faktörü, makine ve teçhizat, kullanılan katkı maddeleri, geri sekme, yüzey faktörü gibi püskürtme betonun karışım dizaynı ve maliyetini etkileyen parametreleri veri girişi olarak sunmaktadır. Ayrıca kullanıcıların isteği doğrultusunda gerekli giriş alanlarında hesaplama yapılmasına imkân tanınmıştır. Hesaplanan sonuçların daha sonradan kullanılması için veri girişlerini temsil eden MS Access türünde veri tabanı oluşturulmuştur.



Uygulamayı kullanacak kullanıcı ilk olarak kullanım amacı menüsünü (Şekil 2) seçerek püskürtme betonun uygulama alanı ekranında ilk seçimleri yapması gerekmektedir. Hesaplama yapılacak zayıf oranları da bu menü içerisinde kullanıcıya sunulmaktadır. Geri sekme oranlarında literatürdeki kaynaklardan (Aka ve Celep; 1978; Arıoğlu ve Yüksel, 1999; Arıoğlu vd., 2008; Celep, 2017) yararlanılmıştır.

Yapının Türü	Zayıf %	
	Kuru Karışım	Yaş Karışım
Döşeme ve kaplamalar	5-10	0-5
Şev ve dişey duvarlar	10-20	5-10
Tavan	15-35	10-20

Şevlerin Stabilitesi Ve Doğal Zeminler  
 Metro Ve Tünel Yapımı  
 Dere Yataktan  
 Su Bakım Tesisleri Altı Yüzey  
 Sulama Kanalları  
 Silo Tamirleri  
 Baraj Onarımı  
 Köprü Onarımı  
 Yapı Elemanları Onarım Ve Güçlendirme  
 Eski Yapıların Adaptasyonu  
 Demiryolu İstasyonu Restorasyonu  
 Çok Katlı Otoparkların Tamiri

Para Birimini Seçiniz

Kaydet

Şekil 2. Açılış ekranı (Splash screen)

Bundan sonraki süreçte, uygulamada kullanım alanı seçildikten sonra gelen ekranda yaklaşık maliyet hesabı yapılacak olan püskürtme beton sisteminin kuru veya yaş olarak parametresinin seçilmesi gerekmektedir. Bu seçimde seçeneklerden sadece birinin aktif hale gelmesi sağlanmıştır. Karışım türünün butonu seçildiği zaman açılan veri giriş sayfasının ekran görüntüsü Şekil 3'de verilmiştir. Ayrıca karışım türü ekranına püskürtme betonun kapasitesi ( $m^3/saat$ ), işçilik, operatör ve makine-teçhizat kirası gibi maliyeti etkileyen parametrelerin girişi yapılmıştır. Her aktif olan ekranın alt kısmında genel bilgilere yönelik kullanıcıya açıklama notları yazılmıştır.

Maliyet Analizi

Dil

Kullanım Amacı | Karışım Türü | Çevresel Koşullar | Beton ve Katkı | Çelik Hasır ve Çelik Lif

Karışım Türü

Kuru Karışım  Yaş Karışım

**Püskürtme Beton Kapasitesi**

15 m<sup>3</sup>/saat  
 20 m<sup>3</sup>/saat  
 25 m<sup>3</sup>/saat  
 30 m<sup>3</sup>/saat

**İşçi Adam/Saat**  TL/SAAT

**Makina Teçhizat Kirası**  TL/SAAT

**Operatör Adam/Saat**  TL/SAAT

**Püskürtme Beton Kapasitesi**

15 m<sup>3</sup>/saat  
 20 m<sup>3</sup>/saat  
 25 m<sup>3</sup>/saat  
 30 m<sup>3</sup>/saat

**İşçi Adam/Saat**  TL/SAAT

**Makina Teçhizat Kirası**  TL/SAAT

**Operatör Adam/Saat**  TL/SAAT

**Mikser Ücreti**  TL/SAAT

Kaydet

Şekil 3. Karışım türü, işçilik ve makine ekranı (Mix type, craftsmanship and machine display)

Kullanıcının çevresel koşullarda kullanacağı menünün ekran görüntüsü Şekil 4'de verilmiştir. Bu ekran sayesinde hava koşulları, işçilik faktörü ve geri sekme ile ilgili girdilerin programa girişi sağlanmıştır. Geri sekme oranı, püskürtme betonun uygulama açısı, karışımın özellikleri, uygulama yüzeyinin konumu ve operatörün deneyimine bağlı olarak değişmektedir. Bunun için kullanıcı otomatik geri sekmeyi seçtiği takdirde program seçilen yüzeye uygun geri sekme faktörünü otomatik olarak ekleyecek şekilde düzenlenmiştir. Ayrıca kullanıcının bu oranı manuel olarak girmesine de olanak sağlanmıştır. Manuel giriş tercih edilecekse sınır değerler arasında giriş yapması gerektiği ile ilgili olarak uyarı yazısı kullanıcının karşısına çıkacak şekilde düzenleme yapılmıştır.

Şekil 4. Çevresel koşullar ekranı (Environmental conditions display)

Çevresel koşulların etkisi programa girildikten sonra beton ve katkı oranlarının belirlendiği menü aktif hale geçmektedir. Beton fiyatları güncel olarak değiştiği için kullanıcının betonun  $m^3$  birim fiyatını manuel olarak programa girmesini sağlayan özellik seçenek olarak eklenmiştir. Kullanıcının betonun uygulanacağı ortama göre seçeceği katkı türleri de menüde verilmiştir. Her katkı türünün püskürtme betonda kullanılacağı miktar/oran programın veri tabanında mevcuttur. Burada kullanıcının sadece kullanacağı katkı türünü belirlemesi ve birim fiyatını programa manuel olarak girmesi sağlanmıştır. Hazırlanan programda katkı maddelerinin çimento hacmi ile orantılı olarak kullanılması için bir formülizasyon oluşturulmuş ve arka planda çalışması sağlanmıştır. Şekil 5’de beton ve katkı veri girişlerinin olduğu ekran görüntüsü verilmiştir.

Şekil 5. Beton ve katkıları ekranı (Concrete and additives display)

Kullanıcı beton ve katkı veri girişlerini tamamladıktan sonra programda çelik hasır ve çelik liflere ait veri girişlerinin yapılacağı menü aktif hale gelmektedir (Şekil 6). Kullanıcının çelik hasır/çelik lif seçeneklerinden herhangi birisini seçmesi sağlanmıştır. Bu seçimin kullanılacak püskürtme betonun kalınlığı ve amacına göre yapılmasına olanak sağlanmıştır. Programın güncelliği açısından hasır çelik ve çelik lif fiyatları manuel olarak giriş yapılacak şekilde düzenlenmiştir. Diğer menülerde olduğu gibi ekranın alt kısmında genel bilgilere yönelik kullanıcıya notlar yazılmıştır.

Şekil 6. Çelik hasır ve çelik lif ekranı (Steel wire mesh and steel fiber screen)

Maliyet analizinin yapılması için gerekli parametrik değerler girildikten sonra hesaplamaların yapılması için gerekli formülizasyon işlemi Şekil 7'de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Burada  $b$  yüzey genişlik,  $\beta$  boşluk oranı katsayısı,  $\Omega$  geri sekme oranı,  $\Psi$  hava durumu etkisi,  $\phi$  operatör deneyimini temsil etmektedir.

Şekil 7. Formüle göre maliyet analizi hesaplama (Cost analysis by Formula calculation)

### 3. Uygulamanın Testi (Application Test)

Geliştirilen uygulamaların sonuçlarını test etmek için Kıyı Enerji Elektrik Üretim A.Ş. firmasının 2012 yılında Erik regülatörü ve HES projesinde kullanılan ve analizi yapılan püskürtme betonun parametreleri vaka çalışmasında kullanılmıştır. Hazırlanan uygulamaların etkinliği ve güvenilirliğini ölçmek için referans olarak seçilen Bekaert firmasından temin edilen 2012 yılı çelik hasır ve çelik telli maliyet kıyaslama uygulaması verileri yazılımda kullanılmak üzere alınmıştır. Projede çelik hasırlı yaş karışım püskürtme beton uygulaması yapılmıştır.

Program  $1 \text{ m}^3$  püskürtme beton maliyetini hesaplaması için planlanmıştır. Genişlik 5m, yükseklik 2m ve kalınlık 0,1m bir alan varsayıp toplamda  $1 \text{ m}^3$  alana yapılacak püskürtme beton fiyatı hesaplanması amaçlanmıştır. Kullanıcı  $1 \text{ m}^3$  alan için hesaplanan fiyatı, hesaplamak istediği alan ile çarparak (birim fiyat x istenilen alan) istenilen toplam maliyeti bulabilmektedir. Hesaplama işlemi için ilk olarak püskürtme betonun örnek projedeki kullanım amacı seçilmiştir (Şekil 8).

Şekil 8. Programa kullanım amacının girilmesi (Entering the purpose of use in the program)

Çalışmada yaş karışım yöntem kullanıldığı için, “Karışım Türü” ekranından “Yaş Karışım” butonu seçilmiştir. 1 saatte atımı yapılan püskürtme beton miktarı seçeneklerden seçilmekte, arka planda ise dakikada yapılan atım miktarı hesaplanarak işçi giderleri dakika bazında ne kadar atım yaptığı hesaplanıp ve maliyete eklenmiştir. İşçi sayısı kişi başına ücret girdisi yapılmaktadır fakat arka planda karışım türüne ve kullanılan işçi sayısına göre hesaplama yapılmaktadır. Örnek çalışmada işçi ücreti 10TL (Adam/Saat) ve operatör ücreti 20TL (Adam/Saat) olarak alınmıştır. Mikser ücreti olarak ise 30TL alınmıştır (Şekil 9).

Şekil 9. Karışım türü girişi (Mix type input)

Uygulama alanındaki hava koşullarının ideal olduğu varsayılarak devam edilmiştir. Firmadan edinilen bilgiler doğrultusunda işçilik kalitesi iyi ve geri sekmede otomatik seçilmiştir (Şekil 10). Arka planda geri sekme literatür taraması sonucunda oluşturulan; kullanıldığı yüzeye göre % oranında etki tablosuna göre maliyete yansıtılmıştır.

Şekil 10. Çevresel koşullar girişi (Environmental conditions input)

Örnek alınan projeye göre betonun m<sup>3</sup> fiyatı 130TL olarak alınmış ve programa aynen yansıtılmıştır. Katkı türü kullanılmadığı için bir veri girişi yapılmamıştır (Şekil 11).

Şekil 11. Beton ve katkı girişi (Concrete and additive input)

Firmadan alınan çalışmada çelik lif ve hasır kullanılmıştır. Çelik hasırın m<sup>2</sup> fiyatı olarak 1,55 TL, çelik lifin m<sup>3</sup> fiyatı olarak 3,44 TL olarak veri girişi yapılmıştır (Şekil 12). Veriler m<sup>2</sup> için verilmiştir, program arka planda düzenleme yaparak 1m<sup>3</sup> püskürtme beton için maliyet hesabı çıkarmaktadır.

Şekil 12. Çelik hasır ve çelik lif girişi (Steel wire mesh and steel fiber input)

Programa tüm veriler girildikten sonra hesapla butonuna basılarak sonuç ekranına geçiş yapılmıştır. Püskürtme betonun maliyeti için girilen bilgiler doğrultusunda, malzeme (beton, çelik) ve makine ve teçhizat ücretleri otomatik olarak sonuç ekranında hesaplanmıştır (Şekil 13).

Örnek uygulamada 1m<sup>2</sup>'lik alan için yapılan püskürtme beton maliyetini vermektedir. Hazırlanan programda ise 10m<sup>2</sup>'lik alan için hesaplama yapmaktadır. *Toplam + Makine teçhizat giderleri = Toplam Maliyeti* formülü ile toplam maliyet çıkmaktadır. Makine teçhizat giderleri ayrı kalem olarak hesaplanmaktadır. Uygulama sonucuna göre 195,68+90=285,68 TL olarak toplam maliyet çıkmaktadır. 285,68/10 yapıldığından örnek çalışmada olduğu gibi 1m<sup>2</sup>'ik alanın maliyet sonucunu vermektedir. Uygulamada maliyet 30,47 TL olarak edilmişken programda yaklaşık maliyet 28,56 TL olarak elde edilmiştir. Firmadan alınan verilerin aktarıldığı programdan elde edilen sonuçlar ile uygulamada yapılan maliyet karşılaştırıldığında benzer olduğu görülmüştür.



SONUÇLAR:	
Beton Hacmi	1,386 m3
Katkı Hacmi	0 lt
Çelik Alanı	10 m2
Beton Fiyatı	180,18 TL
Katkı Fiyatı	0 TL
Çelik Fiyatı	15,5 TL
Mak. Tec. İş. Ücreti	90 TL
Toplam	195,68 TL

Şekil 13. Örnek alınan projenin sonuç ekranı (Result screen of sample project)

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

Bu çalışmada püskürtme betonun geleneksel betondan farklılıkları itibariyle maliyetini etkileyen unsurların tanımlanmasına ve bunlara bağlı olarak yaklaşık maliyetini mümkün olduğunca gerçekçi bir yaklaşımla hesaplamak amaçlanmıştır. Ayrıca yazılımın geliştirilme süreci; güncellemelere açık olması, kullanıcının istekleri doğrultusunda yönlenebilmesi ön planda tutulmuştur.

Çalışmada, püskürtme beton uygulaması yapmak isteyen sektör çalışanları için, püskürtme beton üretiminde yaklaşık maliyetin hesaplamasına olanak sağlayan bir uygulama yazılımı geliştirilmiştir. Uygulamanın hesaplama bölümünde kullanılan birim fiyatlarda T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığının belirlediği birim fiyatlar kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada uygulamanın etkinlik düzeyini ve güvenilirliğinin belirlenmesine yönelik olarak, Bekaert firmasından temin edilen 2012 yılında çelik hasır ve çelik telli maliyet kıyaslama uygulaması verileri yazılımda kullanılarak, hesaplanan değerler ile yazılım çıktıları karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda geliştirilen uygulamanın doğruluk sonuçlarında tutarlı olduğu görülmüştür. Geliştirilen uygulama ile test uygulaması sonucunda elde edilen değerler arasında yaklaşık %5 kadar bir fark olduğu görülmüştür. Betonun tasarım, karışım ve uygulanma safhalarında birçok öngörülemez parametre, ortam koşulları ve değişkenden etkilenebileceği düşünülecek olursa maliyeti konusunda net bir sonuca ulaşmak mümkün olmadığından %5'lik farkın kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu öngörülmüştür.

Yapılan bu çalışma özellikle inşaat sektöründe püskürtme beton uygulaması yapacak olan yüklenici açısından yapılması gereken yapım ve sözleşme yönetimi alanındaki birçok işleve cevap verebilecek bir yazılımın geliştirilmesi bakımından güncel bir konudur. Bu amaçla geliştirilen yazılımın, sektörde ilgili ihtiyaç duyulan tüm verilere ve parametrelere etkin ve hızlı bir şekilde ulaşılmasına olanak sağlayacağı beklenmektedir.

Uygulamanın kolaylıkla istenilen algoritmayı geliştirmeye açık olması bakımından, sonrasında kullanımla birlikte ortaya çıkabilecek gereksinimlerde uygulamanın geliştirilerek daha etkin bir hale dönüştürülmesi muhtemeldir. Püskürtme betonun yaklaşık maliyetini bilgisayar ortamında hesaplama imkânı sağlayan bu uygulama, gerek duyulan ihtiyaçlar doğrultusunda yeni özellikler eklenmesi ile geliştirilebilir olması uygulamanın önemli bir özelliğidir. Böylece yazılımın farklı çalışmalarda uygulanabilmesine olanak sağlanabilecektir.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 1977-YL-09 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca yazılımın test verilerini sağladığı için Bekaert A.Ş firmasına teşekkür ederiz.

## Conflict of Interest (Çıkar Çatışması)

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

## Kaynaklar (References)

- Abanda, F.H. Kamsu-Foguem, B. Tah, J.H.M., 2017. BIM–New Rules of Measurement Ontology for Construction Cost Estimation, *Engineering Science and Technology, an International Journal* 20 (2017) 443–459, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2017.01.007>
- Aka, İ., ve Celep, Z., 1978. Püskürtme Beton ve Uygulaması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 19s.
- Altın, M., ve Allahverdi, N., 2004. Bilgisayar Destekli İnşaat Maliyet Analizleri, *Selçuk Teknik Dergisi*, 3(1), 1-8.
- Arıoğlu, E., ve Yüksel, A., 1999. Tünel ve Yer altı Mühendislik Yapılarında Çözümlü Püskürtme Beton Problemleri, *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi*, İstanbul.
- Arıoğlu, E., Yüksel, A., Yılmaz A.O., 2008. Püskürtme Beton Bilgi Föyleri-Çözümlü Problemler, *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi*, Yayın No: 142, ISBN 978-9944-89-565-1, İstanbul.
- Ayış, H.İ., 2010. Tünel Açma Sistemlerinde Çelik Lifli Püskürtme Betonun Uygulanabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı Yapı Programı, İstanbul.
- Bayraktar, D., ve Bayraktar, E.A., 2016. Yapım İşlerinde Yaklaşık Maliyetin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma, *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2) 2016, 29 – 54.
- Beşer, S.A., 2017. Üst Yapı İnşaat İşlerinin Proje Üretimini ve Saha Uygulamalarının Takip Edilmesinde YBM (Yapı Bilgi Modellemesi – Building Information Modelling) Programları Kullanılmasının İller Bankası Anonim Şirketine Sağlayacağı Yararların İncelenmesi, Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi.
- Bostancıoğlu, E., 2006. Bilgisayar Destekli İnşaat Maliyet Analizleri, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(3), 27-49.
- Börjesson, P., ve Thell, M., 2009. Shotcrete Simulator For Education of Shotcrete Robot Operators, Master of Science Thesis in Computer Science, University of Gothenburg, Department of Computer Science and Engineering, Goteborg, Sweden. <https://gupea.ub.gu.se/handle/2077/22225>, Erişim Tarihi: 20/08/2016
- Celep, Z., 2017. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beşinci Baskı, İstanbul.
- Çakıroğlu, A.M., 2014. In The Mixing Account of Dry Mix Shotcrete Using DELPHI Programming Language. 4<sup>th</sup> International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition, APMAS 2014, 24-27 April 2014, Fethiye/ Muğla.
- Dağdeviren, U., ve Kaymak, B., 2018. Yapay Arı Koloni Algoritması Kullanılarak Betonarme İstinat Duvarlarının Optimum Maliyet Tasarımını Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33:1 (2018) 239-253, doi 10.17341/gazimmfd.406796
- Doğramacı, N., Koçak, A., Ekiz, İ., 2003. Depremde Hasar Gören Yapıların Onarım ve/veya Güçlendirme Maliyetlerinin Toplam Bina Maliyetleri İle Karşılaştırılması, *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 26-30 Mayıs 2003, İstanbul.
- Dziadosz, A., 2013. The Influence of Solutions Adopted at the Stage of Planning the Building Investment on the Accuracy of Cost Estimation, *Procedia Engineering* 54 (2013) 625–635, doi: 10.1016/j.proeng.2013.03.057
- Gerçek, B., İlal, M.E., Tokdemir, O.B., Günaydın, H.M., 2016. Yapı Bilgi Modellemesi Yardımıyla Metraj ve Maliyet Hesabı, 4. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, 3 – 5 Kasım 2016, 786-796.
- Günaydın, H.M., ve Doğan, S.Z., 2004. A Neural Network Approach for Early Cost Estimation of Structural Systems of Buildings, *International Journal of Project Management* 22 (2004) 595–602, doi:10.1016/j.ijproman.2004.04.002
- Juszczyk, M., 2017. The Challenges of Nonparametric Cost Estimation of Construction Works With the Use of Artificial Intelligence Tools, *Procedia Engineering* 196, (2017) 415–422, doi: 10.1016/j.proeng.2017.07.218
- Kanıt, R., ve Baykan, U.N., 2004. Bina Yaklaşık Maliyetinin Çoklu Doğrusal Regresyon ile Belirlenmesi, *Politeknik Dergisi*, 7(4), 359-367.
- Karahan, M., ve Ezin, Y., 2014. PERT-CPM Tekniğiyle Bir İnşaatın Yapım Süresi ve Maliyetlerinin Optimizasyonu, *Bartın Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5(10).
- Klakegg, O.J., ve Lichtenberg, S., 2016. Successive Cost Estimation–Successful Budgeting of Major Projects, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 226 (2016) 176–183. doi: 10.1016/j.sbspro.2016.06.177
- Kırankaya, R.T., 2007. Rusya Federasyonu'nda İnşaat İşçiliği Verimliliğinin ve Proje Karlılığına Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı İşletmesi.
- Kuruoğlu, M., Yönez, E., Topkaya, E., Çelik Y.L., 2012. İnşaat Sektöründe Kullanılan Ön Maliyet Tahmin Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 7(1), 263-272.
- Lee, S.-K, Kim, K.-R, Yu, J.-H., 2014. BIM and Ontology-Based Approach for Building Cost Estimation, *Automation in Construction* 41 (2014) 96–105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.020>
- Özgür, S.H., ve İleri, R., 2002. Eysel Nitelikli Merkezi Atıksu Arıtma Tesisinin Bilgisayar Destekli Tasarımı, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3 (6), 69-76.
- Özgür, E., 2004. Bilgisayar Programlama Dilleri, İnşaat Mühendisleri Odası, İzmir Şubesi, 19, (118).



- Tapao, A., ve Cheerarot, R., 2017. Optimal Parameters and Performance of Artificial Bee Colony Algorithm for Minimum Cost Design of Reinforced Concrete Frames, *Engineering Structures* 151 (2017) 802–820, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.059>.
- Uğur, L. O. 2007. İnşaat Firmalarının Maliyet ve Süre Belirleme Yöntemleri Üzerine Bir Alan Çalışması, 4. İnşaat Yönetimi Kongresi, 30–31 Ekim 2007, İstanbul, Türkiye.
- Yaman, H., ve İlhan, B., 2010. İnşaat Sektörü'nde Bina Enformasyonu Modellemesi Kavramına Genel Bir Bakış, 1. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, 29 Eylül -1 Ekim 2010, ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi, 962-976s., Ankara.
- Yanmaz, Ö., ve Luş, H., 2005. Yapı Güçlendirme Yöntemlerinin Yapı Güçlendirme Yöntemlerinin Fayda-Maliyet Analizi, İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi, 3497-3522, Yazı 233.
- Yüksek, S., Demirci, A., ve Dayı, Ö., 2004. Pulpınar Krom İşletmesinde Püskürtme Beton Uygulamaları ve Sonuçlarının Geleneksel Ahşap Tahkimatla Karşılaştırılması, KAYAMEK'2004-VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Sivas, Türkiye.
- Wang, K.-C., Wang, W.-C., Wang, H.-H., Hsu, P.-Y., Wu, W.-H., Kung, C.-J., 2016. Applying Building Information Modeling to Integrate Schedule and Cost for Establishing Construction Progress Curves, *Automation in Construction* 72 (2016) 397–410, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.10.005>

**EKLER (Appendix)****EK 1. Test için Kullanılan Maliyet Çalışması (Cost study used for testing)**

<b>Bekaert Maliyet Çalışması</b>					
<b>Çelik Hasırlı- Dramix'li Püskürtme Beton Maliyet Karşılaştırma:</b>					
<b>Tahkimat Tipi A</b>					
Kalınlık (mm)	100		90		
Donatı	Q 131 Tek Sıra		20 kg/m3 Dramix 65/35		
<b>2.1. Malzeme</b>					
	Birim Maliyet	Miktar/m2	Maliyet/m2	Miktar/m2	Maliyet/m2
Beton	130	0,10	13,00	0,09	11,70
Hasır	1,8	2,06	3,70		0,00
Dramix	3,6		0,00	1,8	6,48
I Profil					
<b>TOPLAM MALZEME m2</b>			<b>16,70</b>	<b>18,18</b>	
<b>2.2. Diğer giderler</b>					
		miktar	maliyet/m2	mikar	maliyet/m2
overbreak filling (dolgu)		15,0%	2,51	0,0%	0,00
dökülme		10,0%	1,67	5,0%	0,91
hasır bindirme		16,0%	0,59	0,0%	0,00
<b>TOPLAM İLAVE MASRAFLAR m2</b>			<b>4,77</b>	<b>0,91</b>	
<b>2.3. İşçilik</b>					
	saatlik maliyet	saat/m2	maliyet/m2	saat/m2	maliyet/m2
hasır işçiliği (15 m2 hasır /3 adam-saat)	10,50	0,20	2,10	0,00	0,00
püskürtme beton (4 m3 beton /3 adam-saat, dökülme dahil)	10,00	0,09	0,94	0,07	0,71
<b>TOPLAM İŞÇİLİK M2</b>			<b>3,04</b>	<b>0,71</b>	
<b>2.4. EKİPMAN</b>					
	saatlik maliyet	saat/m2	maliyet/m2	saat/m2	maliyet/m2
Çalışma plarfon (15 m2 hasır/ saat)	12,00	0,07	0,80	0,00	0,00
pompa/kompresi (4 m3 beton/saat, dökülme dahil)	85,00	0,03	2,66	0,02	2,01
Tüketim (dizel, yağ, hortum and nozul)	30,00	m3/m2	maliyet/m2	m3/m2	maliyet/m2
		0,13	3,75	0,09	2,84
<b>TOPLAM EKİPMAN m2</b>			<b>7,21</b>	<b>4,84</b>	
<b>2.5 TOPLAM</b>					
Malzeme			16,70		18,18
İlave Masraflar			4,77		0,91
İşçilik			3,04		0,71
Ekipman			7,21		4,84
<b>TOPLAM MALİYET m2</b>			<b>31,71</b>	<b>24,64</b>	



## A NEW METHOD FOR THE AUTOMATIC DETECTION OF VENTRICULAR AND ATRIAL PREMATURE CONTRACTIONS

Zahide Elif AKIN<sup>1</sup>, Süleyman BİLGİN<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Desird Design R&D, Antalya, Turkey

<sup>2</sup> Department of Electrical & Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Akdeniz University, Antalya, Turkey

### Keywords

*Electrocardiogram,  
Atrial Premature Complex,  
Ventricular Premature  
Complex,  
Artificial Neural Networks.*

### Abstract

ECG signals used in the diagnosis of cardiovascular diseases are very important in terms of continuous recording and evaluation during the monitoring of these diseases, determination of appropriate diagnosis and treatment, and observation of possible complications. The most common disturbances among heart diseases are arising from arrhythmias. In this study, it was aimed to detect the cardiac arrhythmias APC and PVC automatically in the computer environment to provide convenience to the physician. In this context, ECG signals were first taken from the MIT-BIH Arrhythmia database and critical points P, Q, R, S, T on the signals were determined. After then, ANN was used for arrhythmia classification as APC, PVC and NSR. It was determined that the best result among the different ANN constructions was obtained with the MLPNN and the accuracy of the test was determined as 99.78% with 3-fold cross-validation and 99.89% with 10-fold cross-validation.

## KARINCİK VE KULAKÇIK ERKEN VURULARININ OTOMATİK TESPİTİNE DAYALI YENİ BİR YAKLAŞIM

### Anahtar Kelimeler

*Elektrokardiyogram,  
Erken Kulakçık Vurusu,  
Erken Karıncık Vurusu,  
Yapay Sinir Ağları.*

### Öz

Kalp-damar hastalıklarının tanısında kullanılan Elektrokardiyogram (EKG) işaretleri, bu hastalıklarının izlenmesi sürecinde sürekli olarak kaydedilip değerlendirilmeleri, uygun tanı ve tedavinin belirlenmesi ve oluşabilecek komplikasyonların gözlemlenmesi açısından oldukça önem taşımaktadır. Kalp hastalıkları arasında en sık karşılaşılan rahatsızlıklar, aritmilerden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada, kalp aritmilerinden olan Erken Kulakçık Vurusu (APC) ve Erken Karıncık Vurusunu (PVC) bilgisayar ortamında otomatik tespit ederek hekime kolaylık sağlamak hedeflenmiştir. Bu kapsamda, ilk olarak MIT-BIH Aritmi veri tabanından EKG sinyalleri alınmış ve sinyaller üzerinde bulunan P, Q, R, S, T kritik noktaları tespit edilmiştir. Sonrasında, Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak APC, PVC ve Normal Sinüs Ritmi (NOR) olarak aritmi sınıflandırılması yapılmıştır. Farklı YSA yapıları arasında en iyi sonucun Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) ile elde edildiği görülmüş ve sınıflandırmada test doğruluğunun 3 katlı çapraz doğrulama ile %99.78, 10 katlı çapraz doğrulama ile de %99.89 olduğu belirlenmiştir.

### Alıntı / Cite

Akın, Z. E., Bilgin, S., (2020). A New Method For The Automatic Detection Of Ventricular And Atrial Premature Contractions, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(1), 165-174.

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

Z.E. Akın, 0000-0001-5358-225X  
S. Bilgin, 0000-0003-0496-8943

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	21.04.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	24.07.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	21.08.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

### 1. Introduction

According to the report of the United Nations in 2015, the world is vis-a-vis with the aging population. According to this report, it is estimated that the number of people aged 60 and over will rise by 1.4 billion from 901 million

\* İlgili yazar / Corresponding author: suleymanbilgin@akdeniz.edu.tr, +90-242-310-6388

in 2030 (United Nations, 2015). Depending on age progression, the cardiovascular system becomes weaker and more susceptible to diseases.

Electrocardiogram (ECG) is one of the most important methods used in the diagnosis of cardiovascular disease. ECG is a type of bioelectric signal obtained by recording the electrical activity of the heart with time. Heart arrhythmias, one of the most common disorders on the heart, also cause many diseases at the same time. Therefore, early diagnosis and treatment of arrhythmias are very important. Arrhythmias are detected by the interpretation of ECG signals taken from the heart by physicians. It, in particular, is frequently used to monitor the amplitude and duration of waves on the ECG, to identify the conduction in the heart, and to identify patients who are the arrhythmia. The types of heartbeat classified in the study are Normal Sinus Rhythm (NSR), Atrial Premature Complex (APC) and Ventricular Premature Complex (PVC). NSR is the reference physiological rhythm of the heart and it is defined as the delivery of the stimulus initiated by the Sinoatrial (SA) node to the myocardium with a correct timing through the cardiac conduction system. The PR interval is between 120 and 200 ms, while the heart rate is between 60 and 100 beats per minute (Goldberger, 2006). APC occurs as a result of premature contraction of the atria with rising stimulation from an ectopic focal in the left or right atrium. P wave in APC arrhythmias is seen earlier than expected. PR interval can be normally short or long depending on the location of the stimulus and of the atrioventricular (AV) node response, while heart rate may vary depending on APC frequency (Goldberger, 2006). PVC occurs as a result of premature contraction of ventricles with rising stimulation from an ectopic focal under the AV junction. PVCs are beats that precede the expected sinus rhythm, have wide QRS complexes and frequently are observed in the QRS complex of P waves. Generally, APCs have similar morphological characteristics such as normal sinus beat, while PVCs have a large degree of change in the QRS complex (Goldberger, 2006). Since the interpretation of ECG signals is a time consuming and demanding process for physicians, detailed analysis and interpretation software that gives the same result as the diagnosis of the physician at high rates by interpreting these signals in the computer environment is being developed and its usage is increasing (Elhaj et al., 2016).

## 2. Literature Survey

Some studies about this classification are available in the literature. The automatic detection of the five basic waves (P, Q, R, S and T), which are produced in the ECG as a response to each heart rate and together with the ECG signal, are very important for cardiovascular evaluation. For example, it allows the diagnosis of cardiac arrhythmias (Tsipouras, et al., 2002; Tran, et al., 2004; De Chazal, et al., 2004; Krasteva, et al., 2006), monitoring of autonomic cardiovascular system changes during sleep and hypertension (Scholz, et al., 1997; Trinder, et al., 2001), shortness of breath such as obstructive sleep apnea syndrome (Zapanta, et al., 2004; Shouldice, et al., 2004) and monitoring of other structural or functional cardiac disorders. The detection of QRS complexes and R hills has been extensively studied over the last two decades (Elgendi, et al., 2014). However, T wave detection was not investigated as comprehensively as the perception of QRS complexes and it was observed that there were still problems with its perception (Goutas, et al., 2005; Wan, et al., 2010; Vazquez-Seisdedos, et al., 2011; Nair and Marziliano, 2014). Whereas accurate detection of T waves is necessary to establish various diagnoses such as acute coronary syndrome (Hayden et al., 2002), acute myocardial infarction (Michael et al., 2002) or potentially fatal arrhythmias (Smith et al., 2010). There are many studies in the literature on the automatic diagnosis of arrhythmias in ECG beats (Luz et al., 2015). In these studies, it was observed that classification processes were mostly made by pattern recognition approaches based on Artificial Neural Networks (ANN) (Yang et al., 2017; Rahhal et al., 2018). At this point, the structure differentiating similar studies from each other is feature extraction methods and different classification algorithms. Polat and Gunes used Principal Component Analysis for the arrangements related to the size of the data set and determined whether there was an arrhythmia in the ECG data using the Smallest Square Support Vector Machine for the diagnosis of arrhythmia. The obtained classification accuracy was calculated as 96.86%, 100% and 100% (Polat and Gunes, 2006). In the ECG signals obtained from the Massachusetts Institute of Technology – Beth Israel Hospital (MIT-BIH) arrhythmia database, among studies based on the automatic detection of APC were generally classified by examining the morphology of the signal (Luz et al., 2005; García et al., 2011; Martis et al., 2012; Ravindra and Dhuli, 2017). Chiu and his team demonstrated a study based on the morphological features of arrhythmias. In their study, they used an experimental group with a healthy group existent NSR and a group of patients existent APC and PVC arrhythmias. Firstly, the QRS complexes on the ECG signals of the subjects were determined by the QRS capture algorithm and then they calculated the similarity of the arrhythmias by using the correlation coefficient and RR intervals. Finally, the algorithm was tested using the MIT-BIH arrhythmia database and the sensitivity was calculated 99,81% for NSR, 81,82% for APC and 95,83% for PVC (Chiu et al. 2005). In the studies, it was seen that Support Vector Machine is generally used in the stage of classification of arrhythmias (Alajlan et al., 2014; Kaya and Pehlivan 2015; Chen et al., 2017; Kumar et al., 2017; Li et al., 2017; Chetan et al., 2018; Hajeb-Mohammadalipour et al., 2018; Raj and Ray 2018). A&F Jovic applied Alphabet entropy, a recently developed symbolic dynamic method into heart rate variability analysis to improve automatic classification (Jovic A&F, 2017). In our previous study on the subject, the accuracy value of

APC, PVC and NSR classification using Discrete Wavelet Transform (DWT) energy levels and Linear Discrimination Analysis (LDA) was obtained as 96.7% (Akin and Bilgin, 2017).

As seen in the literature, there are studies on the classification of different arrhythmias by different methods. However, these studies have different purposes. Some studies classify arrhythmias as normal beat or arrhythmic beat, and some studies classify different arrhythmias, separately. However, when the accuracy rates are examined, according to the purposes of the studies, only 99% accuracy is obtained in the classification of arrhythmia and 98% accuracy in the classification between each other. The aim of this study is the determination of the critical points of P, Q, R, S, T in ECG signals and APC, PVC, NSR arrhythmia classification. Also, the novelty of the study is the use of WQRS, TQ, pb1 and pb2 parameters playing an important role in APC, PVC, NSR classification. These parameters are explained in the feature extraction section of the study. In addition, they are part of the study can be considered as innovative.

### 3. Material and Method

In the study, firstly ECG records were taken from the MIT-BIH arrhythmia database. These signals passed through the pre-processed to remove the noises present on the received records. Subsequently, the feature extraction was performed on the ECG signal for both the detection of critical points and the classification of arrhythmias. P, Q, R, S and T points on the signals were determined with the extracted attributes. At the last stage, arrhythmia classification has been done using different ANN structures according to the beat types APC, PVC and NSR.

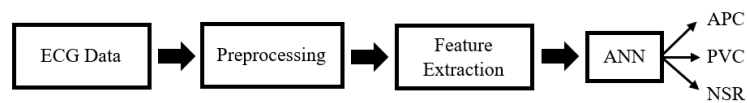


Figure 1. Block diagram of the study

#### 3.1. Database

When the ECG records used in the study were taken from the MIT-BIH Arrhythmia database on Physionet website (Moody and Mark 1990; Goldberger et al., 2000; Anonymous, 2018). The MIT-BIH Arrhythmia database contains half-hour citations of 24-hour ECG recordings, recorded as 48 two-channel recordings, between 1975 and 1992. The records are digitized with 360 Hz sampling frequency at 10 mV intervals and 11-bit resolution per channel after being passed through a filter that has a band of 0.1-100 Hz (Moody and Mark, 2001). For the reliability of ANN, it is so important that the number of datasets in classes is homogeneous. Therefore, data numbers were determined according to arrhythmias beats having the lowest number in the database.

#### 3.2. Pre-processing

Noises analysis on the ECG signal makes difficult and reduces the success of the algorithm. For this reason, the signals are passed the pre-processing in the first stage. In the study, firstly, Savitzky-Golay Filter (SGF) with 2nd order and window size 25 was used to suppress high-frequency components on the signals from the database (Fig.2.). Following Band Pass Filter (BPF) with 7 and 28 Hz cut-off frequencies were then applied to filter the low-frequency noises. Finally, a High Pass Filter (HPF) with a cut-off frequency of 40 degrees and 4.9 Hz was used to remove the baseline slip found in the ECG signal, so that the base level on the signal was equalized. These steps are described in detail in our study about a new QRS detection algorithm (Bilgin and Akin, 2018).

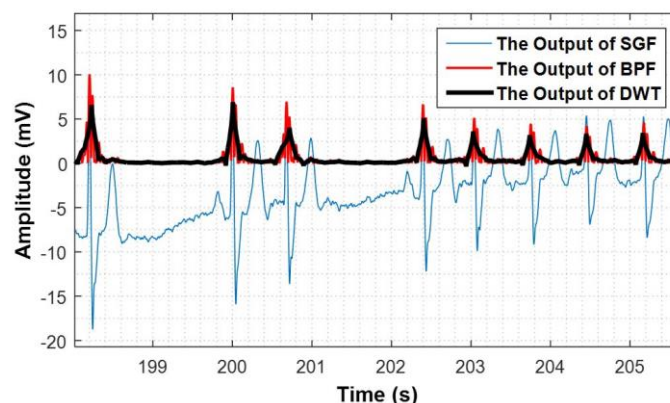


Figure 2. The SGF and DWT output on the ECG

### 3.3. Feature Extraction from ECG Signal

The QRS detection algorithm (Bilgin and Akin, 2018) is used to capture these points in the QRS region. On the captured QRS regions, the peak search algorithm was used and the parts below the specified threshold were subtracted from the signal and the components with the highest amplitude in the remaining parts were searched with specific window intervals and the peak points was determined. So, the R peak values of the signal have been reached (Fig. 3.). In the study, it was tried to catch points Q, R and S first for the automatic detection of critical points.

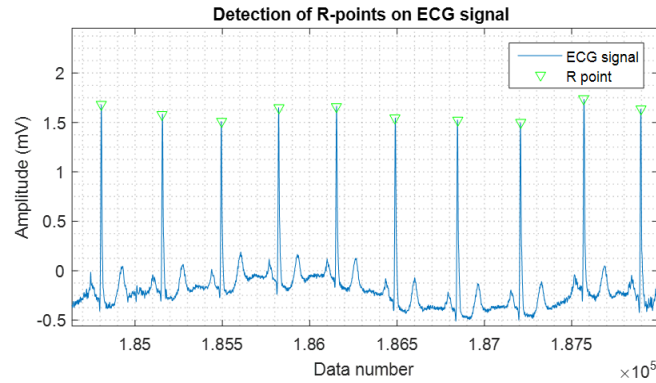


Figure 3. Detection of R points on ECG signal

The QRS height and RR intervals were determined as the feature for the detection of other critical points relative to the obtained R peaks as seen in Fig. 4.

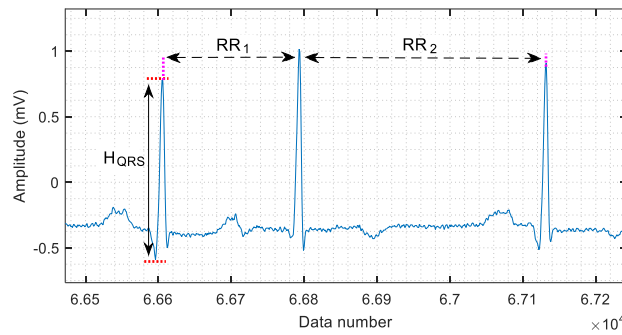


Figure 4. Features extracted for the detection of critical points

After the detection of the R peaks on the ECG signal, the signal RR intervals for the detection of Q and S points were analyzed after being cut off. As shown in Fig. 5., in order to detect S and Q points on the cut parts, the RR intervals were separated into regions and the extremum points were looked at with zero crossings on these regions. The zero crossing is used to detect if a signal in each channel cross zero. For this firstly the function  $P_k(T)$  is calculated. This function is an expression of the discrete distribution of zero-crossing interval durations for the signal  $u(t)$ , in some observation window  $r_k$  as a function of zero-crossing interval duration  $T$ . The function  $P_k(T)$  may be mathematical as;

$$P_k(T) = \sum_{i=1}^{M_k} \delta(T - T_{ki}) \quad (1)$$

where  $\delta(x)$  is the known Dirac delta function.  $M_k$  is defined as the number of zero-crossings which have occurred in a time interval of length  $r_k$ . A count of the total number of zero-crossings in a time window is exactly equivalent to a count of the total number of zero-crossing intervals in the time window. Such a count can be obtained by integrating  $P_k(T)$  over its entire range. Then, normalizing by the duration of the observation window will provide  $Z_k$ . In this way, zero crossing function is expressed by,

$$Z_k = \frac{1}{r_k} \int_{T_0}^{T_L} P_k(T) dT \quad (2)$$

where,  $[T_0 T_L]$  is defined as the range of zero crossing interval durations possible (Niederjohn, 1975). The first derivative of the dt1 signal in Fig. 5., is the calculated second derivative after zero-crossing the dt1 signal at dt2.

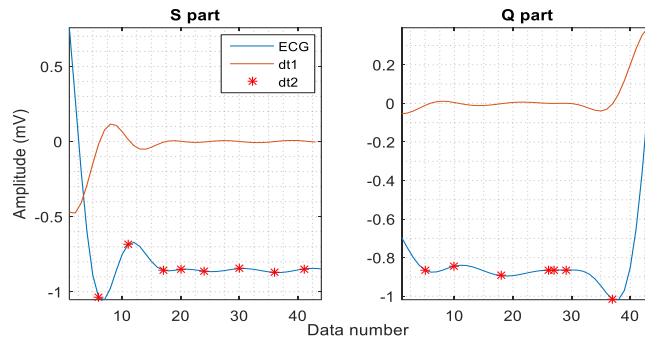


Figure 5. S and Q parts obtained from RR intervals

In the signals, the R-peak in each cycle was referenced, and the extremum point that precedes this peak was the Q-point while the extremum point that follows this peak was determined as the S-point. In this way, Q and S points were determined on the signals. (Fig. 6.).

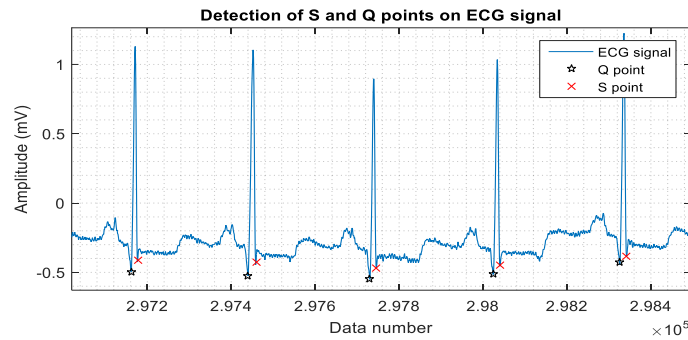


Figure 6. Detection of S and Q points on ECG signal

For the determination of the P and T points between the critical points, the signal was analyzed by cutting from the point S belonging to the previous beat to the point Q of the next beat. On the cut parts, as in the detection of Q-S points, the P region has seen in Fig. 7. was determined and the extremity points were evaluated by taking the derivative from the 2<sup>nd</sup> order. The starting point of both the P point and the P wave was detected via the extremity points. Where dt is the extremity points in the P region, P1 is the point P, and P2 is the starting point of the P wave.

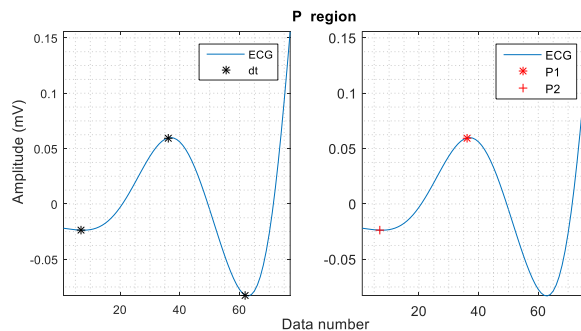


Figure 7. The P region obtained from the SQ part

The same procedure was applied for point T. So, the start/end points of P and T are seen in Fig. 8.

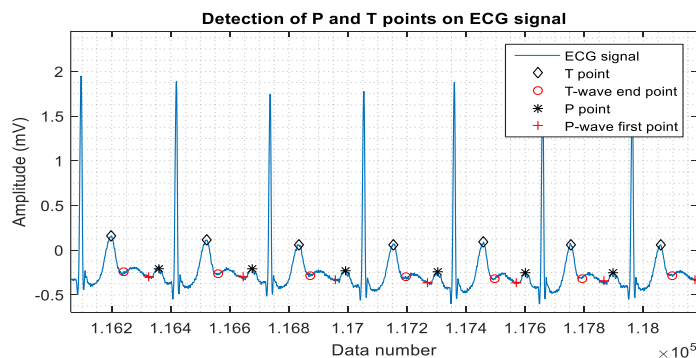


Figure 8. Detection of P and T on ECG signal



Finally, extracted features are shown in Fig. 9.

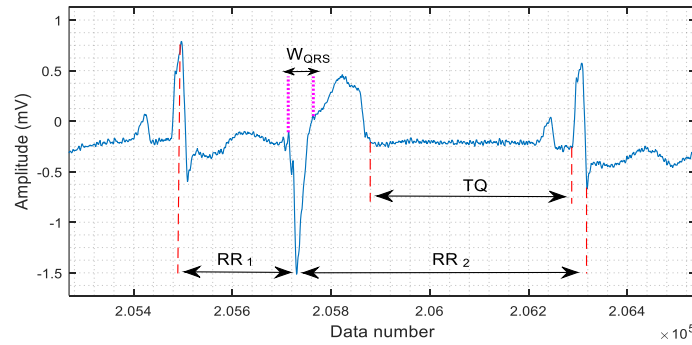


Figure 9. Extracted features for classifying arrhythmias

### 3.4. Artificial Neural Networks (ANN)

ANN are computer systems that are made up of interconnected artificial neural cells, which determine the relationships between events from the samples and then use the information they learn about the samples that they have never seen before. ANN structures are generally used in arrhythmia classification. Therefore, considering the literature, the most prominent choice is the use of ANN (Luz et al., 2015). The information that ANN possesses is stored in the network with the weight values in the connections with each processing element and spread over the network (Hu and Hwang, 2002). Three different ANN structures consisting of MLPNN, Radial basis function neural network (RBFNN) and General regression neural network (GRNN) are applied during the study. Multilayer perceptron neural network (MLPNN) consists of an input layer where information input is made, one or more hidden layers and an output layer (Hu and Hwang, 2002). The output of the MLPNN network structure is as follows,

$$y = f\left(\sum_{i=1}^N X_i W_{ij} + b_j\right), \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (3)$$

In this equation,  $M$  is the number of layers, the number of neurons in the input layer has been denoted by  $N$ ,  $X_i$  refers to the  $i^{\text{th}}$  neuron in a hidden layer,  $W_i$  is explained as weights for each input,  $b_j$  is the bias of the perceptron,  $f$  is the activation function, and  $y$  is the output of the perceptron in the  $j^{\text{th}}$  layer. RBFNN is a model of ANN consisting of an input layer, a core layer and an output layer. Input variables are passed directly through the nodes in the input layer and are connected to the core layer without weight (Hu and Hwang, 2002). GRNN is an ANN structure consisting of an input layer, a pattern layer, an additional layer, and an output layer. It has a dynamic network structure that uses regression analysis (Specht, 1991). Besides, Decision Tree (DT) method was applied alternatively. DT, which uses a multistage or sequential approach to the realization of the classification process, divides the data into subcategories in order to determine the relationship in the data. The basic structure of DT consists of three basic parts called nodes, branches and leaves (Goetz, 2010). In the study, four features were determined for the inputs of the ANN model used in APC, PVC and NSR classification (Fig. 10.). These features are WQRS, TQ, pb1 and pb2. WQRS is defined as QRS width (time difference between point S and point Q). TQ is the time difference between the end point of T and the next point Q (Fossa, 2006). pb1 and pb2 features are explained as RR2/RR1 and RR2-RR1 respectively. The most important novelty of this study is explained in this part. WQRS, TQ, pb1 and pb2 parameters being a distinguishing feature were not used for this type of classification in the previous studies (Akin, 2018).

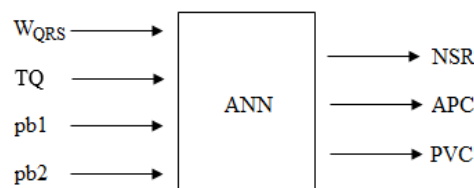


Figure 10. ANN structure used in the study

The determined features were analyzed with different ANN structures and the results were observed. In MLPNN, the Levenberg-Marquardt algorithm was used as the backpropagation training error method to select the weight matrix. Other parameters of the applied ANN constructions are as in Table 1.

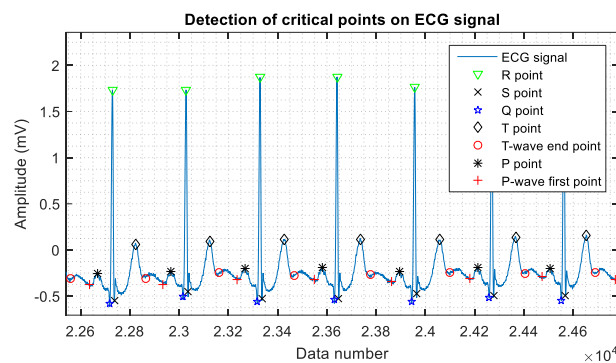
**Table 1.** The Characteristics of the implemented ANN structures.

<b>MLPNN</b>	Number of hidden layers	2
	Number of neurons	[10 10]
	Transfer function	tansig
	Learning function	trainlm
	Learning rate	0.1
	Momentum constant	0.3
	Goal	0.001
<b>RBFNN</b>	Spread parameter	0.9
	Goal	0.001
<b>GRNN</b>	Spread parameter	0.1
	Goal	0.001

The homogeneous distribution of the data used in the ANN procedure is so important for the reliability of the study. Therefore, data numbers were selected based on the lowest number of arrhythmias beats in the database. 300 beats from each arrhythmia type were included in the study so that the numbers of groups are equal to each other. Four features of each beat were applied to ANN entries.

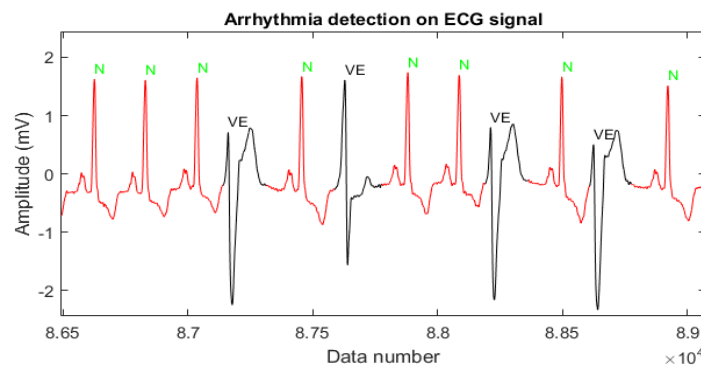
#### 4. Experimental Results

The critical points on the ECG signals received from the MIT-BIH arrhythmia database have been detected as shown in Fig. 11.



**Figure 11.** Detection of critical points on ECG signals

In the study, for the performance evaluation of the detection of critical points, the results of the QRS detect algorithm are referenced. In the performance evaluation of QRS detect algorithm, sensitivity, positive predictive rate, the detection error rate and accuracy values were used and when the results were observed, the overall accuracy value of the algorithm was determined as 99.74% (Bilgin and Akin, 2018). In this study, Q, R and S points were detected by 100% accuracy in each QRS window which is detected correctly. Similarly, since P and T points are cut into pieces and analyzed, they were determined that these points were detected with 100% accuracy upon the correct capture of R point. For the classification of APC and PVC arrhythmias, primarily normal beat and early beat were detected using pb1 (RR2 / RR1) value as shown in Fig. 12. Where, N represents normal beats, while VE represents early beats. As seen in the figure, both APC and PVC arrhythmias were captured with VE. While, the second VE is an APC arrhythmia, the first, third and fourth VEs are PVC arrhythmias.



**Figure 12.** Arrhythmia detection on ECG signal

For discriminating APC and PVC arrhythmias via the VEs, ANN was used. NSR, APC and PVC classification were accomplished with ANN and results obtained in different parameters were observed with K-Fold-Cross-Validation (K-FCV) (Table 2). Training and Testing percentages in the database are chosen as 65% and 35% respectively in ANN applications in the literature (Looney, 1996). Therefore, the selection of the most suitable Cross validation method is 3-FCV (Three Fold Cross Validation) method in order to provide this ratio. As a result, TFCV method is preferred for validation of the methods in this study. On the other hand, in the 10-FCV, Training and Testing percentages are selected as 90% and 10% respectively in ANN applications in the literature.

**Table 2.** 3-FCV and 10-FCV results for NSR, APC and PVC.

Validation	Methods	Results		
		Sens. (%)	Spec. (%)	Acc. (%)
3-FCV	MLPNN	99.67	99.67	99.78
	RBFNN	96.45	98.33	98.22
	GRNN	97.02	97.32	98.11
	DT	99.35	99.67	99.67
10-FCV	MLPNN	100.00	99.68	99.89
	RBFNN	96.55	98.68	98.33
	GRNN	97.35	97.38	98.22
	DT	99.68	99.68	99.78

## 5. Result and Discussion

In this study, the detection of the critical points in ECG recordings obtained from the MIT-BIH arrhythmia database and was made by arrhythmia classification according to NSR, APC and PVC beats. In the pre-processing part of the study, SGF, BPF and HPF were applied to the ECG signal and the signals were prepared for feature extraction. Then, for the determination of both critical points and for the classification of arrhythmias, feature extraction was made via ECG signal. In the classification of NSR, APC and PVC beat, ANN was chosen as the most widely used technique in the literature as a classifier model. The WQRS, TQ, pb1 and pb2 features extracted from the ECG signal are defined as ANN inputs. These features were analyzed with different ANN structures and the results obtained with different parameters were observed with K-FCV. When the results obtained from the study were evaluated, for the success of the critical points was referenced the success of the QRS detect algorithm. According to this, an accuracy of 99.74% was obtained over the 109468 QRS in the database. Within each determined QRS window, the signals were scanned with eye and the Q, R and S points were observed to detect with 100% accuracy. In the same way, P and T points were analyzed by cutting into pieces, and it was determined that these points were determined with 100% accuracy upon correct detected of point R. When the success of arrhythmia classification was observed, it was seen that the best results were obtained with MLPNN in the NSR, APC and PVC classification between the different ANN structures and it was determined that the test accuracy was 99.78% with 3-FCV and 99.89% with 10-FCV. In the study, an original QRS detection algorithm was used to find critical points and the captured points were developed via this algorithm. Analysis based on the determination of critical points and the features used in arrhythmia classification is again based on this algorithm and combined with other methods. This case reveals the originality of the study. According to the results, this study is thought to be an important alternative to facilitate the diagnosis process by acting as a second clinician as a computer-aided analysis and interpretation software in cardiology. Considering this case, If the algorithm in this study is integrated with a computer interface, the interface will be at a level that will automatically detect APC, PVC and NSR on long-term recorded ECG data.

When the results were evaluated, it was observed that the best NSR, APC and PVC classification was 99.89% test accuracy in MLPNN with 10-FCV. Previously, the accuracy of the NSR, APC and PVC classification study, which is based on DWT energy levels was obtained as 96.7% (Akın and Bilgin, 2017). In this study, 4 important features were extracted and the classification is realized according to these characteristics.

As seen in the literature, there are some studies being interested in the classification of different arrhythmias using different methods. However, these studies have different purposes. Alajlan et al. have classified PVC and non-PVC and have achieved a total accuracy of 94.15% (Alajlan et al., 2014). Al Rahhal and his team made only PVC classification in their study. They achieved 98.6% accuracy in the classification using multichannel ECG (Rahhal et al., 2018). Kaya and Pehlivan made PVC classification and achieved 99.63% accuracy (Kaya and Pehlivan 2015). Yang and his team tried to determine the localization of PVC using CNN (Yang et al., 2017). These types of studies classify arrhythmias as binary classification (normal or abnormal beats), and other similar studies classify different arrhythmias separately. However, while the studies focusing on the binary classification obtain approximately 99% accuracy, the others including multiple classifications have about 98% accuracy. The aim of this study is the determination of the critical points of P, Q, R, S, T in ECG signals and APC, PVC, NSR arrhythmia classification. Therefore, the novelty of the study is to determine WQRS, TQ, pb1 and pb2 parameters being so important for APC, PVC, NSR discrimination. In addition, the feature extraction part of the study can be considered as a novel.

## Acknowledgement

This study was supported by Medises Medical and Electronics Co. in Antalya, Turkey (grant number TEYDEB-7151338).

## Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

## References

- Akin, Z.E., Bilgin, S. (2017). Classification of normal beat, atrial premature contraction and ventricular premature contraction based on discrete wavelet transform and artificial neural networks, in: Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO), pp. 1-4. DOI: 10.1109/TIPTEKNO.2017.8238027
- Akin, Z.E. (2018). Automatic Detection of Ventricular and Atrial Premature Contractions, Akdeniz University, MSc thesis.
- Alajlan, N., Bazi, Y., Melgani, F., Malek, S., & Bencherif, M. A. (2014). Detection of premature ventricular contraction arrhythmias in electrocardiogram signals with kernel methods. *Signal, Image and Video Processing*, 8(5), 931-942.
- Al Rahhal, M. M., Al Ajlan, N., Bazi, Y., Al Hichri, H., & Rabczuk, T. (2018, May). Automatic Premature Ventricular Contractions Detection for Multi-Lead Electrocardiogram Signal. In 2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT) (pp. 0169-0173). IEEE.
- Anonymous. <https://www.physionet.org/physiobank/database/mitdb/> (accessed: 29 July 2018)
- Bilgin, S., Akin, Z.E. (2018). A New Robust QRS Detection Algorithm in Arrhythmic ECG Signals, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6 (1), 64-73. DOI: 10.21923/jesd.391625
- Chetan, A., Tripathy, R.K., Dandapat, S. (2018). A diagnostic system for detection of atrial and ventricular arrhythmia episodes from electrocardiogram, *Journal of Medical and Biological Engineering*, 38 (2), 304-315. DOI: 10.1007/s40846-017-0294-5
- Chen, S., Hua, W., Li, Z., Li, J., Gao, X. (2017). Heartbeat classification using projected and dynamic features of ECG signal, *Biomed. Signal Process. Control*, 31, 165-173. DOI: 10.1016/j.bspc.2016.07.010
- Chiu, C.C., Lin, T.H., Liau, B.Y. (2005). Using Correlation Coefficient In Ecg Waveform For Arrhythmia Detection, *Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications*, 17 (03), 147-152. DOI: 10.4015/S1016237205000238
- De Chazal, P., O'Dwyer, M., Reilly, R.B. (2004). Automatic classification of heartbeats using ECG morphology and heartbeat interval features, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 51 (7), 1196-1206. DOI: 10.1109/TBME.2004.827359
- Elgendi, M., Eskofier, B., Dokos, S., Abbott, D. (2014). Revisiting QRS Detection Methodologies for Portable, Wearable, Battery-Operated, and Wireless ECG Systems, *PloS one*, 9 (1), e84018. DOI: 10.1371/journal.pone.0084018
- Elhaj, F.A., Salim, N., Harris, A.R., Swee, T.T., Ahmed, T. (2016). Arrhythmia recognition and classification using combined linear and nonlinear features of ECG signals, *Comput. Methods Programs Biomed.* 127, 52-63. DOI: 10.1016/j.cmpb.2015.12.024
- Fossa, A.A., Wisialowski, T., Crimin, K. (2006). QT prolongation modifies dynamic restitution and hysteresis of the beat-to-beat QT-TQ interval relationship during normal sinus rhythm under varying states of repolarization, *J. Pharmacol. Exp. Ther.* 316 (2), 498-506. DOI: 10.1124/jpet.105.095471
- García, A., Romano, H., Laciari, E., Correa, R. (2011). Development of an algorithm for heartbeats detection and classification in Holter records based on temporal and morphological features, in: *Journal of Physics: Conference Series*, 332 (1), 012023. DOI: 10.1088/1742-6596/332/1/012023
- Goetz, T. (2010). *The Decision Tree: Taking Control of Your Health in the New Era of Personalized Medicine*, New York, NY, USA: Rodale.
- Goldberger, A.L., Amaral, L.A.N., Glass, L., Hausdorff, J.M., Ivanov, P.Ch., Mark, R.G., Mietus, J.E., Moody, G.B., Peng, C-K., Stanley, H.E. (2000). *PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals*, *Circulation*, 101 (23), e215-e220.
- Goldberger, A.L. (2006). *Clinical electrocardiography: A simplified approach*, 7, Mosby Elsevier.
- Goutas, A., Ferdi, Y., Herbeuval, J.P., Boudraa, M., Boucheham, B., (2005). Digital fractional order differentiation-based algorithm for P and T-waves detection and delineation, *ITBM-RBM*, 26 (2), 127-132. DOI: 10.1016/j.rbmret.2004.11.022
- Hajeb-Mohammadipour, S., Ahmadi, M., Shahghadami, R., Chon, K. (2018). Automated Method for Discrimination of Arrhythmias Using Time, Frequency, and Nonlinear Features of Electrocardiogram Signals, *Sensors*, 18 (7), DOI: 10.3390/s18072090
- Hayden, G., Brady, W., Perron, A., Somers, M., Mattu, A. (2002). Electrocardiographic T-wave inversion: Differential diagnosis in the chest pain patient, *Am. J. Emerg. Med.* 20 (3), 252-262. DOI: 10.1053/ajem.2002.32629
- Hu, H.Y., Hwang, J.N. (2002). *Handbook of Neural Network Signal Processing*, New York, NY, USA: CRC Press.
- Jovic, A., Jovic, F. (2017). Classification of cardiac arrhythmias based on alphabet entropy of heart rate variability time series, *Biomed. Signal Process. Control*, 31, 217-230. DOI: 10.1016/j.bspc.2016.08.010
- Kaya, Y., & Pehlivan, H. (2015). Classification of premature ventricular contraction in ECG. *Int J Adv Comput Sci Appl*, 6(7), 34-40.
- Krasteva, V.T., Jekova, I.I., Christov, I.I., (2006). Automatic detection of premature atrial contractions in the electrocardiogram, *Electrotechniques Electronics E & E*.
- Kumar, M., Pachori, R.B., Acharya, U.R. (2017). Characterization of coronary artery disease using flexible analytic wavelet transform applied on ECG signals, *Biomed. Signal Process. Control*, 31, 301-308. DOI: 10.1016/j.bspc.2016.08.018
- Li, T., Ma, J., Pan, X., Zhai, Y., Man, K.L. (2017). Classification of Arrhythmia using Multi-Class Support Vector Machine, in *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*.

- Looney, C.G., 1996. Advances in feedforward neural networks: demystifying knowledge acquiring black boxes. *IEEE Trans. Knowledge Data Eng.* 8 (2), 211–226.
- Luz, E.J.D.S., Schwartz, W.R., Cámara-Chávez, G., Menotti, D. (2016). ECG-based heartbeat classification for arrhythmia detection: A survey, *Comput. Methods Programs Biomed.* 127, 144–164. DOI: 10.1016/j.cmpb.2015.12.008
- Martis, R.J., Acharya, U.R., Mandana, K.M., Ray, A.K., Chakraborty, C. (2012). Application of principal component analysis to ECG signals for automated diagnosis of cardiac health, *Expert Syst. Appl.* 39 (14), 11792–11800. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.04.072
- Michael, S., Brady, W., Perron, A., Mattu, A. (2002). The prominent T wave: Electrocardiographic differential diagnosis, *Am. J. Emerg. Med.* 20 (3), 243–251. DOI: 10.1053/ajem.2002.32630
- Moody, G.B., Mark, R.G. (1990). The MIT-BIH Arrhythmia Database on CD-ROM and software for use with it, in: *Computers in Cardiology, Proceedings*, 17, 185–188. DOI: 10.1109/CIC.1990.144205
- Moody, G.B., Mark, R.G. (2001). The impact of the MIT-BIH arrhythmia database, *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* 20 (3), 45–50. DOI: 10.1109/51.932724
- Nair, A., Marziliano, P. (2014). P and T wave detection on multichannel ECG using FRI, in: *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 2269–2273. DOI: 10.1109/EMBC.2014.6944072
- Niederjohn, R. (1975). A mathematical formulation and comparison of zero-crossing analysis techniques which have been applied to automatic speech recognition, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 23 (4), 373–380. DOI: 10.1109/TASSP.1975.1162702
- Polat, K., Güneş, S. (2007). Detection of ECG Arrhythmia using a differential expert system approach based on principal component analysis and least square support vector machine, *Appl. Math. Comput.* 186 (1), 898–906. DOI: 10.1016/j.amc.2006.08.020
- Raj, S., Ray, K.C. (2018). Sparse representation of ECG signals for automated recognition of cardiac arrhythmias, *Expert Systems with Applications* 105, 49–64. DOI: 10.1016/j.eswa.2018.03.038
- Ravindra, K.N., Dhuli, R. (2017). Classification of ECG heartbeats using nonlinear decomposition methods and support vector machine, *Computers in biology and medicine*, 87, 271–284. DOI: 10.1016/j.combiomed.2017.06.006
- Scholz, U.J., Bianchi, A.M., Cerutti, S., Kubicki, S. (1997). Vegetative background of sleep: Spectral analysis of the heart rate variability, *Physiol. Behav.* 62 (5) 1037–1043. DOI: 10.1016/S0031-9384(97)00234-5
- Shouldice, R., O'Brien, L., O'Brien, C., De Chazal, P., Gozal, D., Heneghan, C. (2004). Detection of obstructive sleep apnea in pediatric subjects using surface lead electrocardiogram features, *Sleep*, 27 (4), 784–792. DOI: 10.1093/sleep/27.4.784
- Smith, D., Nowacki, D., Li, J.J. (2010). ECG T-Wave Monitor for Potential Early Detection and Diagnosis of Cardiac Arrhythmias, *Cardiovasc. Eng.* 10 (4), 201–206. DOI: 10.1007/s10558-010-9106-z
- Specht, D. (1991). A general regression neural network, *IEEE Trans. Neural Netw.* 2, 568–576. DOI: 10.1109/72.97934
- Sun, Y., Chan, K.L., Krishnan, S.M. (2005). Characteristic wave detection in ECG signal using morphological transform, *BMC Cardiovasc. Disord.* 5(1), 28. DOI: 10.1186/1471-2261-5-28
- Tran, T., McNames, J., Aboy, M., Goldstein, B. (2004). Prediction of paroxysmal atrial fibrillation by analysis of atrial premature complexes, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 51 (4), 561–569. DOI: 10.1109/TBME.2003.821030
- Trinder, J., Kleiman, J., Carrington, M., Smith, S., Breen, S., Tan, N., Kim, Y. (2001). Autonomic activity during human sleep as a function of time and sleep stage, *J. Sleep Res.* 10 (4), 253–264. DOI: 10.1046/j.1365-2869.2001.00263.x
- Tsipouras, M.G., Fotiadis, D.I., Sideris, D. (2002). Arrhythmia classification using the RR-interval duration signal, in: *Comput. Cardiol.* pp. 485–488. DOI: 10.1109/CIC.2002.1166815
- United Nations, (2015). Department of economic and social affairs population division, *World population aging 2015*. New York.
- Vazquez-Seisdedos, C., Neto, J., Maranon Reyes, E., Klautau, A., De Oliveira, R.C.L. (2011). New approach for T-wave end detection on electrocardiogram: Performance in noisy conditions, *Biomed. Eng. Online*, 10 (1), 77. DOI: 10.1186/1475-925X-10-77
- Yang, T., Yu, L., & He, B. (2017). Localization of Premature Ventricular Contractions Using Convolutional Neural Network From 12-lead Electrocardiogram. *Circulation*, 136(suppl\_1), A17031-A17031.
- Wan, X., Xu, D. (2010). An ECG T waves detection scheme based on the compensatory criterion, in: *Proceedings of the 2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI)*, pp. 730–734. DOI: 10.1109/BMEI.2010.5640074
- Zapanta, L., Poon, C., White, D., Marcus, C., Katz, E. (2004). Heart rate chaos in obstructive sleep apnea in children, in: *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 3889–3892. DOI: 10.1109/IEMBS.2004.1404088



## SICAK PLAKA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ PA6 VE CAM ELYAF KATKILI TÜREVLERİNİN NEM ALMA DAVRANIŞININ KAYNAK MUKAVEMETİNE ETKİSİ

Sami SAYER<sup>1</sup>, Can ÖZYAMAN<sup>2</sup>, Çiçek ÖZES<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Ege Meslek Yüksekokulu, Polimer Teknolojisi Bölümü, Bornova, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Buca, İzmir, Türkiye

<sup>3</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Sıcak Plaka Kaynağı,  
Nem Alma,  
PA6,  
GF Katkılı PA6.

### Öz

Polimer esaslı termoplastik malzeme grubunda yer alan poliamid, yüksek mukavemet ve yüksek sıcaklıklara dayanma özelliklerinden dolayı endüstrinin farklı alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Poliamid (PA) malzemelerin monomer yapısına bağlı olarak nem alma davranışları malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Endüstrinin farklı alanlarında yarı mamul olarak üretilen ürünlerin, üretim şekli ve kullanım alanlarına bağlı olarak kaynak yöntemi ile birleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, PA6 ve cam elyaf katkılı türevlerinden üretilmiş olan numuneler sıcak plaka kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Nem alma davranışının kaynak mukavemetine etkisini araştırmak amacıyla, numuneler -20 °C ile 60 °C sıcaklık aralığında 16 saat bekletilerek yapay olarak şartlandırılmıştır. Kaynaklı numunelerde, şartlandırma sıcaklıklarının artması ile PA6 malzemede nem alma oranının arttığı, mekanik mukavemet değerlerinin azaldığı ve yüzde uzama değerlerinin ise arttığı gözlenmiştir. Cam elyaf katkılı numunelerde ise nem alma oranında önemli bir değişiklik olmamıştır. Şartlandırma sonrasında, en yüksek kaynak mukavemeti PA6 malzemede 0 °C' de 34 MPa, PA6 GF15'te -10 °C'de 38MPa ve PA6 GF30'da ise -20 °C'de 41MPa olarak ölçülmüştür.

## THE EFFECT OF MOISTURE INTAKE ON THE WELD STRENGTH OF PA6 AND ITS GLASS FIBER REINFORCED DERIVATIVES JOINED BY HOT PLATE WELDING

### Keywords

Hot Plate Welding,  
Dehumidification,  
PA6,  
GF Reinforced PA6.

### Abstract

Polyamide, which belongs to the group of polymer-based thermoplastic materials, is widely used in different fields of industry due to its high strength and high temperature resistance properties. Depending on the monomer structure of polyamide (PA) materials, the dehumidification behavior significantly affects the mechanical properties of polyamide-based materials. Semi-finished products manufactured for different areas of the industry should be joined by means of welding methods depending on the production methods and usage areas. In this study, samples produced from PA6 and glass fiber reinforced PA6 were combined by hot plate welding method. In order to investigate the effect of dehumidification behavior on the welding strength, the samples were artificially conditioned at a temperature range of -20 °C to 60 °C for 16 hours. In welded samples, it was observed that the dehumidification rate of PA6 material increased, mechanical strength values decreased and percent elongation values increased with the increase of conditioning temperatures. There was no significant change in the rate of dehumidification for glass-fiber reinforced samples. After conditioning, the highest weld strength was measured as 34 MPa at 0 °C for PA6, 38MPa at -10 °C for PA6 GF15 and 41MPa at -20 °C for PA6 GF30.

### Alıntı / Cite

Sayer, S., Özyaman, C., Öz, Ç., (2020). Sıcak Plaka Kaynağı İle Birleştirilmiş Pa6 Ve Cam Elyaf Katkılı Türevlerinin Nem Alma Davranışının Kaynak Mukavemetine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 175-184.

\*İlgili yazar / Corresponding author: cicek.ozes@deu.edu.tr, +90-232-301-9207

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
S. Sayer, 0000-0002-6532-7499	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	22.05.2019
C. Özyaman, 0000-0002-2502-2025	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	21.08.2019
Ç. Özses, 0000-0002-0027-818X	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	25.08.2019
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Üretim tekniğine, fiziksel özelliklerine ve teknolojik kullanım alanlarına göre plastikler; ticari plastikler, mühendislik plastikleri ve yüksek performanslı plastikler olarak sınıflandırılmaktadır. PE, PP, PVC, PS gibi ticari plastikler 100 °C altındaki sıcaklıklarda ve yüksek mekanik mukavemet gerektirmeyen alanlarda kullanılır. Mühendislik plastiklerinin (PA, PC, PET vb.) kullanım sıcaklığı 100 - 150 °C aralığındadır. Yüksek performanslı plastikler (PEK, PES, PSU vb.) ise,  $\pm 250$  °C sıcaklık aralığında yüksek mekanik mukavemet ve aşınma direnci gerektiren yerlerde, metal ve metal dışı malzemelere alternatif olarak tercih edilmektedir.

Son yıllarda teknolojik gelişmelere ve üretim tekniklerine paralel olarak, farklı termoplastik malzemelerin kaynakla birleştirilmesi bilim insanlarının odaklandığı temel araştırma konularından biri olmuştur. Sıcak plaka kaynak yöntemi enjeksiyon, ekstrüzyon ve diğer üretim yöntemleriyle üretilen termoplastik malzemelerin kaynakla birleştirilmesinde tercih edilen önemli bir kaynakla birleştirme prosesisidir (Kocatüfek, 2013; Nanying vd., 2004; Walter vd., 1992; Wolfgang, 2015; Dominghaus, 1988; Johannaber ve Michaeli 2002).

Bu kapsamda, Olivera vd. (2001), PP esaslı malzemeleri sıcak plaka kaynak yöntemi ile birleştirerek kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini ve mikro yapısını incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada, kaynak mukavemetine etki eden parametrelerin en uygun değerlerini 240 °C plaka sıcaklığı, 50s ısıtma süresi ve 0,35 mm birleştirme stroğu olarak belirlemişlerdir. Olivera vd. (2001), yapmış oldukları bir diğer çalışmada ise, %20 ve %30 oranında talk katkılı PP malzemeleri sıcak plaka kaynağı ile birleştirerek, talk katkısının kaynak mukavemetine etkisi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada talk oranının artmasının PP malzemelerde kaynak mukavemetinin azalmasına neden olduğunu saptamışlardır. Talk katkı oranı %20 olan PP malzemelerde kaynak mukavemetinde maksimum %50 oranında olurken, %30 katkılı PP malzemelerde kaynak mukavemeti %45 oranında olmuştur. Shih ve Cheng (2010), PP ve cam elyaf katkılı (%20 - %30) malzemeleri, sıcak plaka kaynak yöntemi ile birleştirerek kaynak bölgesini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda kaynak kalitesine etki eden parametrelerin plaka sıcaklığı, ısıtma süresi ve kaynakla birleştirilecek yüzey geometrisi en etkili parametreler olduğunu tespit etmişlerdir.

Watson ve Murch (1989), termoplastik malzemelerden PP, HIPS, PPO üzerinde yapmış oldukları çalışmalarda, sıcak plaka kaynağı için en önemli kaynak parametrelerinin, plaka sıcaklığı ve ısıtma süresi olduğunu tespit etmişlerdir. Stokes (1998), plaka sıcaklıklarının ayrı ayrı kontrol edilebildiği çift plakalı sıcak plaka kaynak makinasında üç farklı polimerin birbirleriyle kaynak edilebilirliğini çalışmıştır. Bu çalışmalarda termoplastik malzeme olarak PEI, PC ve PBT kullanılmıştır. Bu deneysel çalışmada ısıtma süresiyle ergimiş malzeme film kalınlığı, kaynak bölgesindeki taşan malzeme miktarı ise kaynak makinası üzerine yerleştirilmiş olan iki farklı stoplama pimleri ile kontrol altına alınmıştır. Bu çalışmada yukarıda belirtilen termoplastik malzemeler alın tipi kaynak yöntemi ile birleştirilerek, plaka sıcaklığı ve ısıtma süresine bağlı olarak kaynak mukavemetindeki değişimler incelenmiştir. Stokes yapmış olduğu bu çalışma ile farklı termoplastiklerin birbirleriyle kaynak edilebileceğini kanıtlamıştır.

Stokes (1999), yapmış olduğu diğer bir çalışmada ise PC malzemenin sıcak plaka kaynağı ile birleştirilmesinde malzemenin nem alma miktarının kaynak mukavemetine etkilerini çalışmıştır. Çalışmanın sonucunda kurutulmuş polimer malzemelerle üretilen numunelerin kaynak mukavemetlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Stokes ve Conway (2001), farklı ticari termoplastik malzeme karışımlarının sıcak plaka kaynağı yöntemiyle kaynak edilebilme kabiliyetlerini ve kaynak mukavemetlerini incelemişlerdir. Çalışmada PC/ABS, PC/PBT ve PFO/PA karışımlarından (blend) üretilen 3,2 mm kalınlığında kaynak numuneleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda bu malzeme grupları için en uygun kaynak parametrelerinin, plaka sıcaklığı, ısıtma süresi ve kaynak nüfuziyeti olduklarını tespit edilmişlerdir.

Lee vd. (2012), yapmış oldukları çalışmada çift cidarlı PE boruları alın altına sıcak plaka kaynak yöntemiyle birleştirerek, kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada da plaka sıcaklığı ve ısıtma süresi temel kaynak parametresi olarak ön plana çıkmıştır. Kaynakla birleştirilen boruların kaynak kalitesi borulara içeriden uygulanan basınçlı hava testi ile kontrol edilmiştir. Araştırma sonucunda, sıcak plaka kaynağı ile atık su borularının başarılı bir şekilde yeniden kaynakla birleştirilerek tamir edilebileceği doğrulanmıştır.



Kocatüfek vd. (2013), mühendislik plastiklerinden olan PA ve cam elyafli türevlerini sıcak plaka kaynak yöntemiyle birleştirilerek kaynak parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Yapmış oldukları araştırmada PA6 ve PA6 GF15 için en uygun kaynak parametreleri ısıtma süresi 25s, kaynak mesafesi 1mm olduğu, PA6 ve PA6 GF15'te plaka sıcaklığının sırasıyla 250 °C, 270 °C olduğu tespit edilmiştir. PA6 GF30 için en uygun kaynak parametreleri ise plaka sıcaklığı 270 °C, ısıtma süresi 30 s, kaynak mesafesi 1,5 mm olarak bulunmuştur.

Termoplastik malzemelerin monomer yapısına bağlı olarak nem alma davranışları değişmektedir. Bu durum malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Suyun moleküler yapısında ortaklaşmamış elektronlar bulunduğundan su molekülü polar yapıdadır. Monomer yapısında C, H dışında N<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> olan PA malzemelerin makro moleküler yapıları da polardır. Bu nedenle makro moleküler yapıları polar olan polimerlerin nem alma özellikleri vardır. Apolar yapıdaki polimerler (PE gibi) ise nem almazlar. Ayrıca sıcak su nem alma tepkimesini hızlandırmaktadır. Bu yüzden şartlandırma sıcaklığı arttıkça PA malzemenin nem alma yüzdesi de artmaktadır. Vlasveld vd. (2005), PA6 silikat katkılı nano kompozitlerin nem miktarındaki değişimi ve bunun sonuçlarının malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu araştırmada farklı silikat miktarlarına sahip PA6 nano kompozitlere nem aldırılarak, elastisite modülündeki ve süneklikteki değişim incelenmiştir. Araştırma sonucunda, numunelerin silikat oranı arttıkça elastisite modülünün arttığı, nem miktarının artmasıyla da elastisite modülünün azaldığı tespit edilmiştir.

Chaichanawong vd. (2016) ise, PA66 ve cam elyaf takviyeli türevlerini 60 gün boyunca saf suda bekleterek nemin malzemelerin mekanik özelliklerindeki değişimi araştırmışlardır. Bu araştırmada, ilk 7 günde malzemenin mekanik özelliklerinin önemli ölçüde azaldığı ve nem alma miktarının ise arttığı görülmüştür.

Bascheka vd. (1999), PEI, PEEK, PES, PC, PA12 ve PA6 malzemelerin 4 – 320 K sıcaklık aralığında nem alma davranışlarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada çok düşük sıcaklıkta nem alma miktarının, mekanik mukavemeti beklenmedik bir şekilde etkilediği ve düşük sıcaklıklarda elde edilen bu sonuçların, hidrojen bağlı suyun özelliklerini daha iyi anlamak için bir araç olabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Moralioğlu (2013), ASTM D 618 standardına uygun olarak enjeksiyon metodu ile PA6 ve PA66 malzemelerden çekme numuneleri üreterek, malzemelerin nem alma davranışının mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Yaptığı çalışmada çekme numunelerini 80 °C su içerisinde 10, 20 ve 30 saat süre ile şartlandırmıştır. Araştırma sonucunda, PA6 ve PA66 malzemelerinin nem alma sonrasında akma ve kopma mukavemetlerinin azaldığı, sünekliğinin, darbe dayanımının ve yüzde uzama değerlerinin ise arttığı görülmüştür.

Yapılan literatür araştırması sonucunda sıcak plaka kaynağı ile birleştirilen ve apolar özellikteki termoplastik malzemelerin nem alma davranışının kaynak mukavemetine etkisi konusundaki eksikliğin yapılan bu çalışma ile giderilmesi amaçlanmıştır. Araştırmada PA6 ve cam elyaf katkılı türevlerinden üretilmiş numuneler sıcak plaka kaynağı ile birleştirildikten sonra, 16 saat süre ile -20 °C ile 60 °C sıcaklık aralığında yapay olarak şartlandırılarak mekanik özellikleri incelenmiştir,

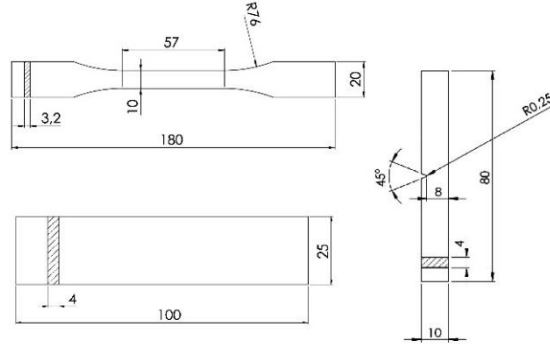
## 2. Malzeme ve Metod (Material and Method)

Monomer yapısına bağlı olarak poliamid esaslı malzemelerin nem alma davranışları malzemenin bulunduğu ortama bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. PA ve türevlerinin nem alma davranışı, laboratuvar şartlarında %0,7 - %3,5 arasında değişirken, 23 °C su sıcaklığında bekletilen PA tipi malzemelerin nem alma miktarı ağırlıkça %1,3 - %10 arasında değişmektedir. PA tipi malzemelerin nem alma miktarı, malzemenin mukavemet, sertlik ve süneklik/esneklik gibi malzeme özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle parça tasarım aşamasında kullanılacak yere uygun malzeme seçimi yapılması gerekir. Enjeksiyon ve ekstrüzyon prosesleri öncesinde PA tipi malzemeler, granülün içerisinde bulunan nem miktarına bağlı olarak 80 – 100 °C sıcaklıkta 2 – 4 saat kurutulması gerekir. Polimer esaslı malzemelerde kaliteli bir ürün elde etmek için, üretim öncesinde malzemenin bünyesinde kalan maksimum nem miktarı % 0,2 seviyesinde olması literatürde önerilmektedir (Nanying vd., 2004; Walter vd., 1992; Wolfgang, 2015; Dominghaus, 1988; Johannaber ve Michaeli 2002). PA tipi malzemeler neme duyarlı (higroskopik) oldukları için metal (alüminyum) bariyerli HDPE torbalar içinde saklanarak ortamdaki nem alması engellenmektedir. Plastik enjeksiyon metoduyla üretilen poliamid parçalar, ilk üretildiği anda tamamen kuru olarak kalıptan çıkar ve bu andan itibaren havadaki nemi bünyesine almaya başlar. Plastik parçadaki bu nem miktarı zamanla artar ve belirli bir süre sonra kararlı hale gelir. PA6 tipi malzemeler laboratuvar ortamında 4 ay gibi bir süre bekletildiklerinde %2,5 oranında nem alırlar (Nanying vd., 2004; Johannaber ve Michaeli 2002). Bu nedenle PA tipi malzemelerin nem alma davranışını hızlandırmak için yapay olarak şartlandırmak gerekir. PA esaslı malzemelerin farklı ortamlarda nem alma miktarları ve malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir (Walter ve Günther, 1992).

**Tablo 1.** Bazı Poliamid (PA) Türlerinin Teknik Özellikleri (Technical Properties of Some Polyamide (PA) Types)

PA Türü	PA6	PA6 GF30	PA66	PA6 GF35	PA11	PA12	
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,13	1,36	1,14	1,4	1,04	1,02	
Nem alma	23°C Sıcaklık RH 50	2,5 - 3,5	1,6 - 2,2	2,5 - 3,1	1,5 - 1,9	0,8 - 1,2	0,7 - 1,1
	23°C Sıcaklık Su içinde	9 - 10	5,7 - 6,3	8 - 9	4,7 - 5,3	1,6 - 2,0	1,3 - 1,7
Elastisite modülü (N/mm <sup>2</sup> )	1400	5000	2000	10000	1000	1600	
Kopma dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	40	100	65	160	50	45	
Kopma Uzaması (%)	200	-	150	5	500	300	
Çentik darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	25	17	20	14	40	10 - 20	

Bu araştırmada PA6, PA6 GF15 ve PA6 GF30 tipi malzemeler kullanılmıştır. Kaynak ile birleştirilecek numuneler, çentik darbe numuneleri ve çekme çubukları Ege Üniversitesi Polimer Teknolojileri Laboratuvarları'nda ASTM D 618 standardına uygun olarak plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiştir. Numunelerdeki nem miktarının kararlı hale gelmesi için literatüre göre laboratuvar ortamında 4 ay bekletilmesi gerekmektedir (Nanying vd., 2004; Johannaber ve Michaeli 2002). Araştırmada, Bölüm 2.2'de anlatılan yapay şartlandırma işlemi uygulanarak numunelerin nem miktarının kısa sürede kararlı hale gelmesi sağlanmıştır. Çekme çubuğu, kaynakla birleştirilecek olan numune ve çentik darbe numunesine ait boyutlar Şekil 1 de gösterilmiştir.

**Şekil 1.** Numune Boyutları (Sample Sizes)

## 2.1. Sıcak Plaka Kaynağı (Hot Plate Welding)

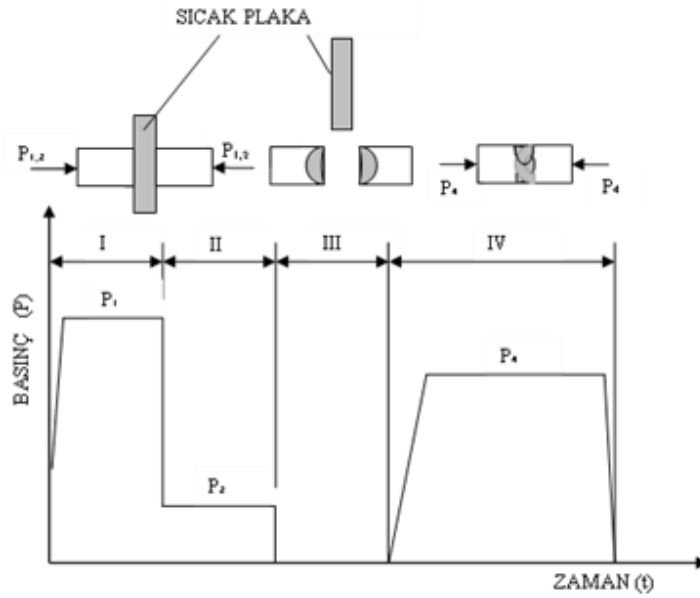
Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kaynak numuneleri sıcak plaka kaynak (SPK) yöntemi ile birleştirilmiştir. Sıcak plaka kaynak yöntemi 1960'lı yıllardan günümüze kadar termoplastiklerin kaynak ile birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Sıcak plaka kaynağı ile birleştirilecek olan termoplastik parçalar, tanımlanmış plaka sıcaklığında ve ısıtma süresinde ısıtıcı plakaya temas ettirilerek ergimesi sağlanır. Daha sonra birbirine bastırılan parçaların kaynakla birleşmesi sağlanır. Sıcak plaka kaynağı dört proses adımından oluşmaktadır. Proses aşamaları sırasıyla aşağıda tanımlandığı gibidir.

1. Aşamada, belirlenen ısıtma süresinde ve ısıtıcı plaka sıcaklığında, ısıtıcı plakadan kaynak ile birleştirilecek olan parçaya ısı transferi gerçekleşmektedir. Bu aşamada parçanın tam olarak ısıtıcı plakaya temas ettiğinden emin olunmalıdır.

2. Aşamada, ergime sıcaklığına gelen poliamid parçadaki eriyik malzeme akışkan hale gelmeye başlar. Termal genişlemeye bağlı olarak ergimiş poliamidin bir kısmı sıcak plaka yüzeyinde damlacık oluşturur ve basınç sabit tutulduğu için eriyik tabaka kalınlaşır. Isıtma süresine bağlı olarak eriyik bölge ilerler.

3. Aşamada, parçaların arasından ısıtıcı plaka çekilir. Kaynak bölgesinde soğumanın önlenmesi için ısıtıcı plakanın hızlı bir şekilde plastik parçalar arasından çekilmesi (mak. 3 s) önerilir (Ehrenstein, 2004), şayet bu süre uzun olursa kaynak kalitesi olumsuz etkilenecektir.

4. Aşamada, malzemeler belirlenen yaklaşma mesafesinde (birleştirme stroğu) sabit basınç altında (2 bar) birleştirilir. Ergiyen parçanın birleşme bölgesi çevresince soğuma ve katılma esnasında kaynak bölgesinden dışarıya doğru malzeme akışı meydana gelmektedir (Kocatüfek, 2013). Sıcak plaka kaynağıyla birleştirilecek olan parçaların proses aşamaları ve basınç - zaman grafiği Şekil 2'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Sıcak Plaka Kaynağı Proses Aşamaları (Hot Plate Welding Process Steps)

Sıcak plaka kaynağında kaynak mukavemetine etki eden parametreler, malzeme, ısıtıcı plaka sıcaklığı, ısıtma süresi, birleştirme basıncı ve birleştirme stroğudur. Bu çalışmada PA6 ve PA6 GF15 için ısıtma süresi 25 s, kaynak mesafesi 1 mm; PA6 GF30 için, ısıtma süresi 30 s, kaynak mesafesi 1,5 mm; PA6 ve PA6 GF15 için plaka sıcaklıkları sırası ile 250 °C, 270 °C, ve PA6 GF30 için 270 °C olarak seçilmiştir (Kocatüfek, 2013). Kaynakla birleştirme işlemleri Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

## 2.2. Poliamidlerin Şartlandırılması (Conditioning of Polyamides)

Kayma, aşınma direnci ve mekanik mukavemeti yüksek olan poliamidlerin genel olarak şartlandırma ile süneklikleri artırılabilir. Poliamid parçalarının nem alma süresini kısaltmak ve nem oranını istenen değerde tutabilmek için parçalar su veya su buharı içerisinde bekletilerek şartlandırılır.

Şartlandırma sonucunda poliamid esaslı malzemelerden üretilmiş olan parçalarda nem oranı kararlı hale gelir ve bu sayede üretilen ürün istenilen teknik özelliklere sahip olur. Eğer poliamid parçalar herhangi bir şartlandırma ve depolama olmadan kullanılırsa ortamın neminden etkilenerek zamanla mekanik özelliklerinde ve ölçülerinde sapmalar meydana gelecektir.

Bu araştırmada, PA6, PA6 GF15 ve PA6 GF30 malzemelerden üretilen kaynaklı numuneler, çentik darbe numuneleri ve çekme çubukları, DEÜ Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan sabit sıcaklık banyosunda -20, -10, 0, 30 ve 60 °C sıcaklıklarda 16 saat süre ile bekletilerek şartlandırılmıştır. Her bir sıcaklık için minimum 3'er adet numune şartlandırılarak sonuçlar ortalama üzerinden değerlendirilmiştir. Numunelerin bu şartlandırma işleminden önceki ( $W_i$ ) ve sonraki ağırlıkları ( $W_s$ ) 1/10.000 hassasiyete sahip terazi ile ölçülerek, numunenin bünyesine aldığı nemin yüzdesi Eşitlik (1) 'e göre hesaplanmıştır.

$$\%W = (W_s - W_i) / W_i \times 100 \quad (1)$$

## 2.3. Çekme Testleri (Tensile Tests)

Çekme çubukları ve kaynaklı numunelerin çekme testleri, DEÜ Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Araştırma ve Test Laboratuvarı'nda bulunan, 100 kN yük kapasitesine sahip Shimadzu AG-X çekme testi cihazında, 5mm/dk çekme hızında ve oda sıcaklığında yapılmıştır.

Her bir şartlandırma su sıcaklığında (-20, -10, 0, 30 ve 60 °C) 16 saat bekletilen numunelere, TS EN ISO 527 standardına uygun olarak çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi standardında belirtildiği gibi, çekme çubuğunda  $L_o = 50$  mm, kaynaklı numunelerde ise  $L_o=100$  mm alınarak, numuneler ile ilgili gerilme - uzama eğrileri elde edilmiştir. Şekil 3'te sıcak plaka kaynağı ile birleştirilmiş olan kaynak numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 3. Sıcak Plaka Kaynağı ile Birleştirilmiş Kaynak Numunesi (Welding Sample Joined with Hot Plate Welding)

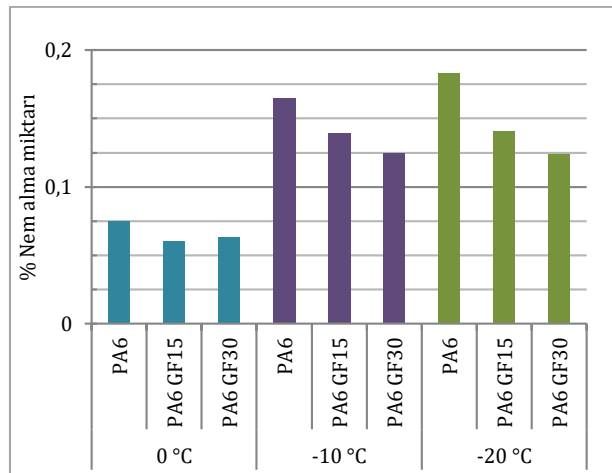
## 2.4. Çentik Darbe Testi (Notch Impact Test)

Ege Üniversitesi Polimer Teknolojisi Laboratuvarında ASTM D 618 standardına uygun olarak enjeksiyon metodu ile PA6 ve cam elyaf katkılı türevlerinden üretilen çentik darbe numunelerine çentik darbe testi, DIN 53453 standardına uygun olarak, DEÜ Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Her bir şartlandırma su sıcaklığı (-20, -10, 0, 30 ve 60 °C) için 4'er adet numune çentik darbe testine tabii tutulmuştur.

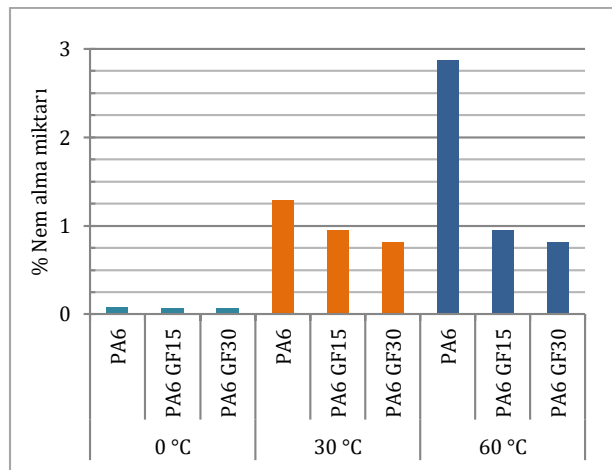
## 4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

### 4.1. Numunelerin Nem Alma Miktarı (Dehumidification Amount of Samples)

Kaynaklı numuneler, çentik darbe numuneleri ve çekme çubukları su banyosunda 16 saat bekletilerek yapay olarak şartlandırılmıştır. Hassas terazi ile tartılan numunelerin ağırlıkça nem alma yüzdelerinin ortalamaları farklı malzeme tiplerine göre Şekil 4 ve Şekil 5'de verilmiştir. Ağırlık ölçümleri sonucunda, sıfırın altındaki sıcaklıklarda (0, -10 ve -20°C) numunelerin düşük oranda (%0,07 - %0,18) nem aldığı görülmüştür.



Şekil 4. 0, -10 ve -20°C'de Şartlandırma Sıcaklığına Bağlı Nem Alma Yüzdesi (Dehumidification Percentage Depending on Conditioning Temperature at 0, -10 ve -20°C)



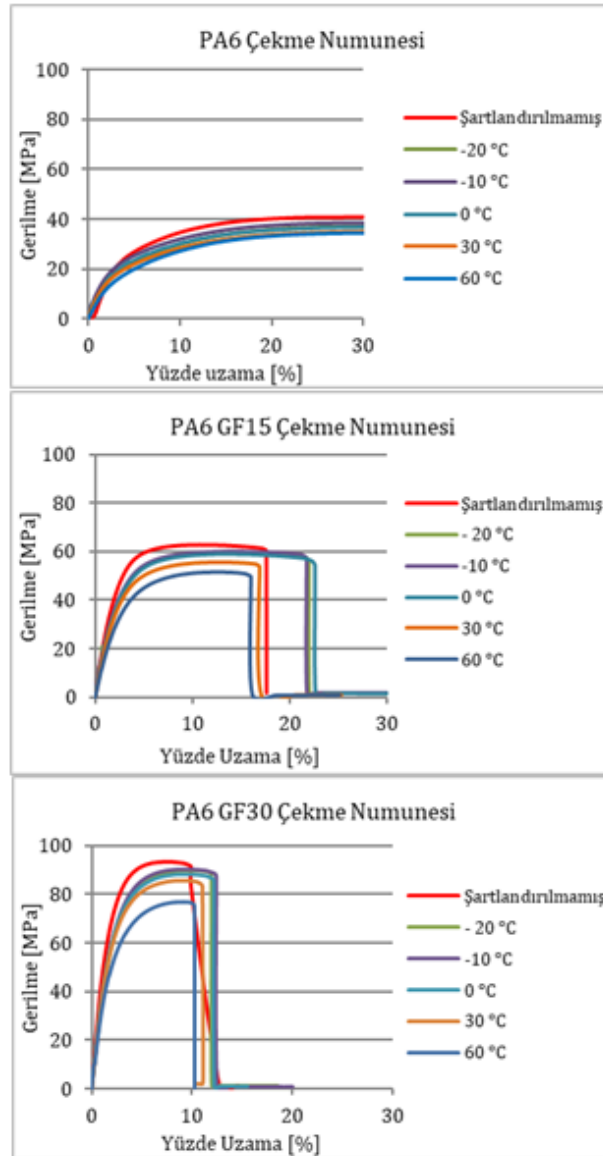
Şekil 5. 0, 30 ve 60°C'de Şartlandırma Sıcaklığına Bağlı Nem Alma Yüzdesi (Dehumidification Percentage Depending on Conditioning Temperature at 0, 30 ve 60°C)

### 4.2. Nem Alma Miktarının Kaynak Mukavemetine Etkisi (The Effect of Dehumidification on Welding Strength)

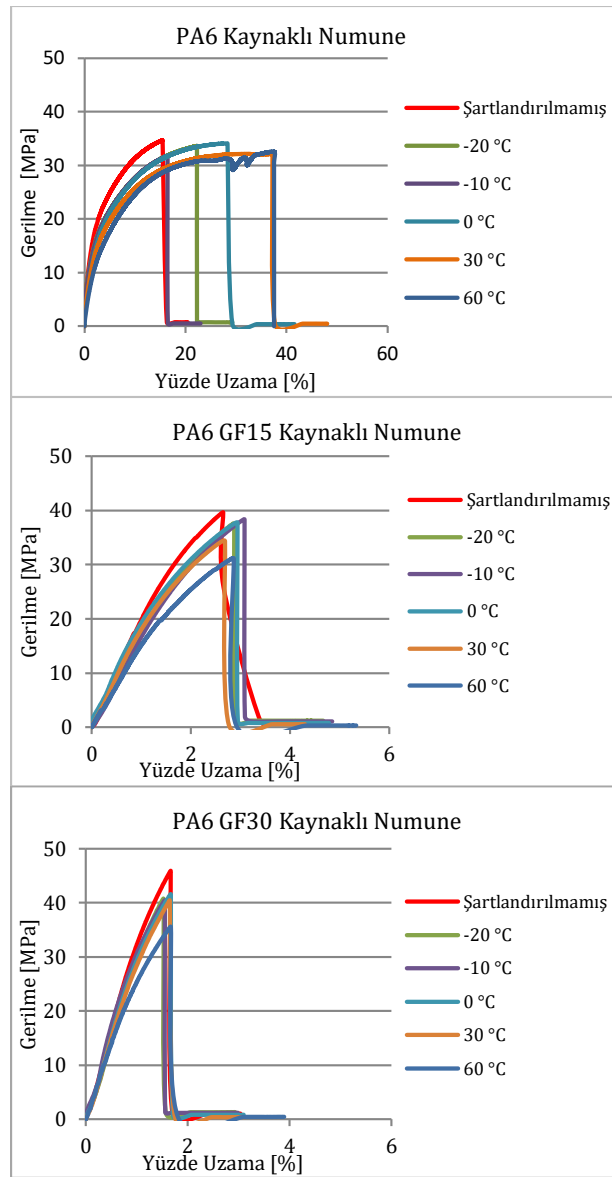
Şartlandırılmamış PA6 tipi malzemelerde çekme numunelerinde ortalama 40,5 MPa maksimum gerilme değerine

ulaşırken, sıfırın altındaki sıcaklıklardan şartlandırılmış olan numunelerde bu değer ortalama olarak 38 MPa' a kadar düşmektedir. Sıcaklığın artmasıyla PA6 tipi malzemelerde maksimum gerilme değerlerinin, 60 °C sıcaklıkta 35 MPa' a kadar düştüğü gözlenmiştir. PA6 GF 15 ve PA6 GF 30 tipi malzemelerde de şartlandırma sonucunda malzemenin maksimum gerilmelerinde de benzer değişiklikler gözlenmiştir. PA6, PA6 GF15 ve PA6 GF30 tipi malzemelerin farklı sıcaklıklarda şartlandırılmış ve şartlandırılmamış çekme numunelerinin gerilme - şekil değiştirme grafikleri Şekil 6'da gösterilmiştir.

Şartlandırılmamış PA6 kaynaklı numuneler ortalama 35 MPa da koparken, sıfırın altındaki sıcaklıklarda şartlandırılan numunelerde bu değer ortalama 34 MPa seviyesindedir. Şartlandırma sıcaklıklarının artması ile kaynaklı numunelerin nem alma miktarı artmakta ve sonuç olarak mekanik mukavemet düşmektedir. Yüksek sıcaklıklarda, 60 °C şartlandırılmış kaynaklı numunelerin kopma mukavemeti ortalama 32,5 MPa dır. PA6 GF15 ve PA6 GF30 tipi malzemelerdeki değişimde benzer düzeydedir. Farklı sıcaklıklarda şartlandırılan malzemelerin kaynaklı numunelerinin ve şartlandırılmamış kaynaklı numunelerinin gerilme - şekil değiştirme grafikleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



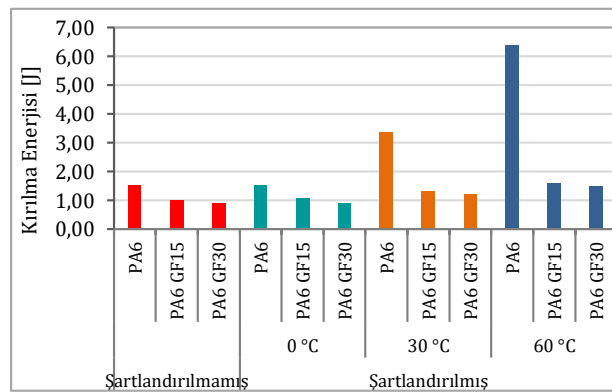
Şekil 6. Çekme Numunelerine ait Gerilme-Şekil Değiştirme Grafikleri (Stress-Strain Graphics for Tensile Samples)



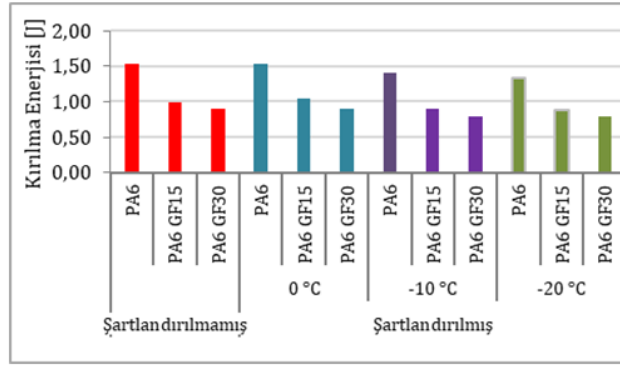
Şekil 7. Kaynaklı Numunelere ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafikleri (Stress-Strain Graphics of Welded Samples)

#### 4.3. Çentik Darbe Deneyi Sonuçları (Notch Impact Test Results)

Çentik darbe numunelerinin kırılma enerjilerindeki değişimleri, 0 °C üzerindeki ve altındaki sıcaklıklarda olmak üzere 2 farklı grupta incelenmiştir. Şekil 8'de 0 °C üzerindeki sıcaklıklarda sıcaklığın artmasıyla birlikte numunelerin kırılma enerjisinin arttığı, Şekil 9'da 0 °C'nin altındaki sıcaklıklarda sıcaklığın azalması ile numunelerin kırılma enerjisinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 8. PA6 ve cam elyafı türlerinin 0 °C üzerindeki sıcaklıklarda kırılma enerjisi değişimi (Fracture Energy Variation of PA6 and Glass Fiber Types at Temperatures above 0 °C)



**Şekil 9.** PA6 ve cam elyaflı türevlerinin 0 °C altındaki sıcaklıklarda kırılma enerjisi değişimi (Fracture Energy Variation of PA6 and Glass Fiber Types at Temperatures below 0 °C)

Her iki durumda literatür ile uyumludur (Domininghaus 1988; Johannaber and Michaeli 2002; Ehrenstein, 2004, Yeni vd. 2010). Numunelerde şartlandırma sıcaklıklarına bağlı olmaksızın, cam elyaf oranı arttıkça malzemelerin kırılma enerjisi azalmaktadır.

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

PA6 malzemelerde, şartlandırılmamış çekme çubuğu ve kaynak numunesi karşılaştırıldığında, kaynakla birleştirme sonrasında mekanik mukavemet kaybının ortalama %14,6 oranında olduğu görülmüştür. Farklı sıcaklıklarda yapılan şartlandırmalarda kaynaklı numuneler ve çekme çubuğu karşılaştırıldığında, mekanik mukavemet kaybının %5,8-%10,5 aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Mekanik mukavemet kaybının en düşük olduğu şartlandırma sıcaklığı 60 °C olarak saptanmıştır.

PA6 GF15 malzemelerde, şartlandırılmamış çekme çubuğu ve kaynak numunesi karşılaştırıldığında, kaynakla birleştirme sonrasında mekanik mukavemet kaybının ortalama %37 olduğu görülmüştür. Farklı sıcaklıklarda yapılan şartlandırmalarda kaynaklı numunelerin mekanik mukavemet kaybının %37-39 aralığında olduğu gözlemlenmiştir.

PA6 GF30 malzemelerde ise, şartlandırılmamış çekme çubuğu ve kaynak numunesi karşılaştırıldığında, kaynakla birleştirme sonrasında mekanik mukavemet kaybının ortalama %51 olduğu görülmüştür. Farklı sıcaklıklarda yapılan şartlandırmalarda kaynaklı numunelerin mekanik mukavemet kaybının %52-54 aralığında olduğu gözlemlenmiştir.

PA6 malzemelerde, cam elyaf oranı arttıkça çentik darbe numunelerinin kırılma enerjileri azaldığı ve aynı zamanda mekanik mukavemet kaybının arttığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak; Termoplastik malzemelerin monomer yapısına bağlı olarak nem alma davranışları değişmektedir. Bu durum malzemenin mekanik özelliklerini zaman içinde önemli ölçüde etkilemektedir. Suyun moleküler yapısında ortaklaşmamış elektronlar bulunduğu için su molekülü polar yapıdadır. Monomer yapısında C, H dışında N<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> olan PA malzemelerin makro moleküler yapıları da polardır. Bu nedenle makro moleküler yapıları polar olan PA malzemelerin nem alma özellikleri vardır ve zamana bağlı olarak nem alma miktarları artmakta, mekanik özellikleri ise azalmaktadır. PA esaslı malzemelerin nem alma miktarı belirli bir seviyeye geldiğinde malzeme özellikleri stabil hale gelmektedir. Endüstriyel uygulamalarda PA esaslı malzemelerin malzeme özelliklerinin stabil halde olması için, PA esaslı malzemelerden üretilmiş olan ürünlerin şartlandırılması gerekmektedir. Bu araştırmada kaynakla birleştirme sonrasında uygulanan şartlandırma sonucunda, malzemenin mekanik mukavemet değerleri bir miktar düşmüş, ancak malzeme özelliklerinin stabil hale gelmesi sağlanmıştır. Yapılan bu araştırmada kaynaklı numuneler için mekanik mukavemet kaybının en düşük olduğu şartlandırma sıcaklığı PA6 tipi malzemeler için 60 °C olarak saptanmıştır. Poliamid esaslı malzemelerde şartlandırma sıcaklığı kadar şartlandırma süreleri de oldukça önemlidir, bu kapsamda farklı şartlandırma sürelerinin de malzeme özelliklerine ve kaynak mukavemetine etkisinin araştırılması endüstriyel uygulamalar açısından faydalı olacaktır.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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



**Kaynaklar (References)**

- Bascheka G., Hartwiga G., Zahradnik F., 1999. Effect of Water Absorption in Polymers at Low and High Temperatures. *Polymer*, 40, 3433-3441.
- Chaichanawong J., Thongchuea C., Areerat S., 2016. Effect of Moisture on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyamide Composites. *Advanced Powder Technology*, 27, 898-902.
- Domininghaus H., 1988. *Die Kunststoffe und Ihre Eigenschaften*, Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Ehrenstein G.W., 2004. *Handbuch Kunststoff – Verbindungstechnik*. München: Carl Hanser Verlag.
- Johannaber F., Michaeli W., 2002. *Handbuch Spritzgießen*. München: Carl Hanser Verlag.
- Kocatüfek U.E., 2013. Poliamid Esaslı Malzemelerde Cam Elyaf Katkısının Sıcak Plaka Kaynağı Üzerinde Etkisinin Araştırılması. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Kocatüfek U., Yeni Ç., Ülker A., Sayer S., Özdemir U., 2013. Cam Elyaf Takviyeli Poliamid 6 Kompozit Malzemede Sıcak Plaka Kaynak Parametrelerinin Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu. II Ulusal Ege Kompozit Malzeme Sempozyumu, Kasım 7 – 9, İzmir, 467-488.
- Lee B., Kim J., Lee S., Kim Y.K., 2012. Butt-Welding Technology for Double Walled Polyethylene Pipe. *Materials and Design*, 35, 626-632.
- Moralhoğlu U.E., 2013. Effects of Moisture after Injection on the Mechanical Properties of PA6 and PA66 Materials. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Nanying J., Howard A.F., Val K.A., 2004. Effects of Moisture Conditioning Methods on Mechanical Properties of Injection Molded Nylon 6. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23 (7), 729-737.
- Oliveira M.J., Bernardo C.A., Hemsley D., 2001. Morphology and Mechanical Behavior of Polypropylene Hot Plate Welds. *Polymer Engineering and Science*, 41, 1913-1922.
- Oliveira M.J., Bernardo C.A., Hemsley D.A., 2001. The Effect of Flame Retardants on the Hot Plate Welding of Talc Filled Polypropylene. *Polymer Engineering and Science*, 42, 146-15.
- Shih J.L., Cheng F.C., 2010. The Influence of Interface Geometry on the Joint Strengths of Hot Plate Welded Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, 497-509.
- Stokes V.K., 1998. Experiments on the Hot-Tool Welding of Three Dissimilar Thermoplastics. *Polymer*, 39 (12), 2469-2477.
- Stokes V.K., 1999. A Phenomenological Study of the Hot-Tool Welding of Thermoplastics. *Polymer*, 40, 6235-6263.
- Stokes V.K., Conway V.R., 2001. A Phenomenological Study of The Hot-Tool Welding of Thermoplastics. 4. Weld Strength Data For Several Blends. *Polymer*, 42 (17), 7477-7493.
- Vlasveld D.P.N., Groenewold J., Bersee H.E.N., Picken S.J., 2005. Moisture Absorption in Polyamide-6 Silicate Nanocomposites and its Influence on the Mechanical Properties. *Polymer*, 46 (26), 12567-12576.
- Walter H., Günther H., Siegfried H., 1992. *Werkstoff-Führer Kunststoffe*. Deutsch: Carl Hanser Verlag.
- Watson M.N., Murch M.G., 1989. Recent Developments in Hot Plate Welding of Thermoplastics. *Polymer Engineering and Science*, 29, 1382-1386.
- Wolfgang K., 2015. *Kunststoffchemie für Ingenieure*. Carl Hanser Verlag.
- Yeni Ç., Sayer S., Ülker A., 2010. Poliamid Parçaların Üretim Sonrasında Nem Alarak Şartlandırılması. *PAGEV Plastik Dergisi*, 111, 296-302.



## SOKAK AYDINLATMALARINDA KULLANILACAK YÜKSEK GÜÇLÜ LED'LERİN TERMAL PERFORMANSININ SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Burcu ÇİÇEK\*, Necmettin ŞAHİN

Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye.

### Anahtar Kelimeler

LED,  
Isı Borusu,  
ANSYS,  
Türbülans Modeli.

### Öz

Bu çalışmada, sokak aydınlatmalarında kullanılan yüksek güçlü LED'lerin soğutulması için ısı borulu soğutucu tasarımı yapılmıştır. Dört adet yüksek güçlü LED, dörtgenel alüminyum plaka üzerine yerleştirilmiş ve U şeklinde üç adet silindirik bakır ısı borusu, alüminyum plakanın içinden geçecek şekilde monte edilmiştir. Isı borusunun ısıyı doğal taşınım ile dış ortama aktarabilmesi için, ısı borusunun yoğunlaştırıcı bölgesine kanatçıklı soğutucu plaka yerleştirilmiştir. Tasarlanan sistemin termal analizi, nümerik olarak ANSYS Fluent yazılımında yapılmıştır. Analizlerde sırasıyla, 15 W, 20 W ve 25 W'lık elektriksel giriş güçlerinin sistem sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Buna ek olarak, sayısal analizlerde, çözüm metodu olarak farklı türbülans modeli ve duvar yaklaşımlarının sıcaklık dağılımına etkisi de incelenmiştir. Sayısal çözümlerin doğrulanması için deneysel çalışma yapılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar birbiriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

## NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE THERMAL PERFORMANCE OF HIGH POWER LEDs TO BE USED FOR STREET LIGHTING

### Keywords

LED,  
Heat Pipe,  
ANSYS,  
Turbulence Model.

### Abstract

In this study, heat pipe - heat sink geometry was designed for cooling high power LEDs used in street lighting. Four high-power LEDs were placed on a rectangular aluminum plate and three U-shaped cylindrical copper heat pipes were mounted so that they will pass through aluminum plate. In order to transfer heat from heat pipe to the ambient by natural convection, a heat sink with fins was placed in the heat pipe condenser zone. Thermal analysis of the designed system was carried out numerically in ANSYS Fluent software. Analysis were performed for 15 W, 20 W and 25 W of electrical input power, respectively. In addition, the effects of different turbulence models and wall approaches on temperature distribution were also investigated. Experimental study was performed to verify numerical solutions. Numerical and experimental results were observed to be consistent.

### Alıntı / Cite

Cicek, B., Sahin, N., (2020). Sokak Aydınlatmalarında Kullanılacak Yüksek Güçlü LED'lerin Termal Performansının Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Mühendislik ve Tasarım Bilimleri Dergisi, 8(1), 185-197

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

B. Çiçek, 0000-0002-1777-4980  
N. Şahin, 0000-0002-5756-4216

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	03.05.2019
Revizyon Tarihi / Revision Date	19.08.2019
Kabul Tarihi / Accepted Date	25.08.2019
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2020

### 1. Giriş (Introduction)

Gelişen teknoloji ile birlikte, ışık yayan diyotlar (LED), enerji tasarrufu, yüksek ışık akısı, güvenilirlik ve uzun ömür gibi avantajlarından dolayı genel aydınlatmalarda tercih edilmektedir (Pimputkar vd., 2009). Bütün bu avantajlara rağmen, LED'ler, üzerine uygulanan elektriksel gücün sadece %20-25'lik kısmını ışık enerjisine dönüştürürken, geriye kalan kısmını ısı enerjisine dönüştürmektedir. LED'lerde yüksek sıcaklığa neden olan bu durum, LED'in ışık

\*İlgili yazar / Corresponding author: cicekb@aksaray.edu.tr, +90-382-288-3691

çıkışı, ışık rengi ve ömrünü olumsuz etkilemektedir. Özellikle yüksek güçlü LED'lerde, jonksiyon sıcaklığı, izin verilen sınırın altında tutulmalıdır. Bu nedenle, LED'in etkin termal yönetimi, LED performansını artırmak için kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, sokak aydınlatmalarında kullanılan yüksek güçlü LED'lerin soğutulması için soğutucu model tasarımı yapılmıştır. Tasarımda, U şeklinde bakır ısı boruları alüminyum soğutucu plakaya entegre edilmiştir. Geliştirilen soğutucu model üzerinde yüksek güçlü dört adet eş COP LED kullanılmıştır. Tasarlanan sistem sayısal olarak 15 W, 20 W ve 25 W elektriksel giriş gücü için analiz edilmiştir. Sayısal model farklı türbülans modeli ve duvar yaklaşımlarında tekrar edilmiştir. Analizler sonunda, sistemin belirli noktadaki sıcaklık değeri alınıp, jonksiyon sıcaklıkları elde edilmiştir. Sayısal sonuçların doğrulanması için deneysel çalışma yapılmıştır. Buna göre geliştirilen model için uygun türbülans modeli ve duvar yaklaşımı belirlenmiştir.

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Literatürde LED'lerin soğutulmasına yönelik birçok çalışma mevcuttur. Isıl iletkenliği yüksek, herhangi bir ek bir parça ve bakım gerektirmeyen ve dolayısıyla maliyeti düşük olan ısı boruları, LED'lerin soğutulması için uygun bir yöntem olarak görülmektedir. Elnaggar vd. (2011) PC-CPU soğutması için U şeklinde ısı borusu kullanmışlardır. Isı borusuna kanatçıklı soğutucu plaka monte edilmiştir. Sistem, dikdörtgensel bir tünel içersinde yer alan bir ısı kaynağı üzerine dikey olarak monte edilmiştir. Toplam termal direnç ve ısı transfer katsayısının belirlenmesi için hem sayısal hem de deneysel çalışma yürütülmüştür. Tang vd. (2014) yüksek güçlü LED'li aydınlatma için kurşun çerçeveli sütun ısı borusu (CHP) geliştirmişlerdir. Kurşun çerçeveli ısı borusu, radyal alüminyum soğutucu plakaya monte edilmiştir. Isı borulu LED'li aydınlatmanın termal performansı, parlaklığı ve kromatikliği deneysel olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, yüksek güçlü LED'li aydınlatmalarda, kurşun çerçeveli sütun ısı borusunun iyi bir performans sergilediği görülmüştür. Cai vd. (2017) çoklu ısı kaynağı olan elektroniklerin ısı dağılımını sağlamak için, çok dallı bir ısı borusu geliştirmişlerdir. Geliştirilen ısı borusu, iki buharlaştırıcı ve bir yoğunlaştırıcıdan oluşan, buhar ve sıvı hatları ile birbirine bağlantılı üç kola sahiptir. Isı borusunun doluluk oranı, başlangıç özellikleri, güç dağılım grafiği ve termal direncini incelemek için testler uygulanmıştır.

Moon vd. (2016) tarafından yüksek güçlü LED'li aydınlatma için ısı borusu geliştirmişlerdir. Isı borusunun etrafına U şeklinde düz alüminyum kanatçıklar yerleştirilmiştir. 100 W'lık tekli LED, oluşturulan soğutucunun üstüne monte edilmiştir. Tasarlanan ısı borulu sistem, alüminyum kanatçıkların farklı boyutları için modellenerek, simüle edilmiştir. Simülasyon sonucu optimum boyutlar belirlenmiştir. Wang vd. (2017) yüksek güçlü LED'leri soğutmak için soğutucu plaka olarak alüminyumdan yapılmış radyatör modeli kullanmışlardır. Radyatör modelinde, bir mandrel etrafına radyal tipi düz kanatçıklar eklenmiştir. Daha sonra mandrel kısmına bir ısı borusu monte ederek elde edilen modelin termal davranışını nümerik çalışma ile incelemişlerdir. Sonrasında nümerik çalışmadan elde edilen verilerin doğrulanması için deneysel testler yapılmıştır. Sonuçlar, radyatör yüksekliği, kanatçık sayısı ve yüksekliği artırıldığında, LED jonksiyon sıcaklığının düştüğünü ve kanatçık kalınlığının, Nu sayısı üzerindeki etkisinin % 1'den az olduğunu göstermiştir.

Schmid vd. (2017) 150 W'lık LED sokak aydınlatmaları için, aktif bir hava soğutma sisteminin parçası olarak, çift borulu bir ısı değiştiricisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal olarak, iki boyutlu, simetrik eksenli bir model oluşturulup, boru uzunluğu, malzeme iletkenliği, akış yönü, boru çap oranı, kütle akış hızı ve ısı aktarım hızı gibi değişen parametrelerin sistemin termal davranışına etkisi incelenmiştir. Sayısal çalışmadan alınan veriler, deneysel verilerle uyumlu çıkmıştır.

LED'lerin soğutulması için tasarlanan ısı borulu sistemlerin termal analizleri deneysel çalışmaların yanı sıra sayısal analizler de yapılmıştır. Suresh ve Bharama (2016) iki fazlı bir ısı değiştirici olan titreşimli ısı borusu (PHP) tasarlamıştır. Tasarlanan ısı borusu, ANSYS CFX'de modellenip simüle edilmiştir. Buharlaştırıcıdaki aseton sıcaklığındaki düşüş, ısının kondenser bölgesine taşındığını göstermiştir. Isı borusunu oluşturan evaporatör, kondenser ve adyabatik bölgelerindeki hava ve aseton hacimsel oranının PHP içindeki akış modeline yansıtıldığı görülmüştür.

Asmaie vd. (2013) iki fazlı akış ile ısı transferi sağlayan termosifonun simülasyonu için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modeli geliştirmişlerdir. Çalışma akışkanı olarak damıtılmış su ve CuO/su nanoakışkanı kullanılmıştır. Sonuçlar, nanoakışkandaki ısı transferinin, suya göre yaklaşık % 46 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte nanoakışkan konsantrasyonu artırılarak duvar sıcaklığının azaldığı ve optimum konsantrasyon değerinin ağırlıkça % 1 olduğu görülmüştür.

Ashish vd. (2016) ısı borusunun termal davranışını farklı işletme koşullarında deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Tasarlanan modelin simülasyonu ANSYS Fluent yazılımında yapılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar birbiriyle uyumlu çıkmıştır. Isı borusu damıtılmış su ve 40 nm ve 70 nm çapındaki CuO + BN hibrit

nanoparçacıkları ile yüklenmiştir. Sonrasında güç girişleri, ısı borusu eğim açısı ve nanopartikül konsantrasyonunun ısı borusunun termal direncine etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, % 2'lik hacimsel konsantrasyondaki CuO + BN / H<sub>2</sub>O hibrit nanoakışkanların maksimum ısı transferi sağlamak için etkili olduğunu göstermiştir.

Lin vd. (2013)minyatür salımlı ısı borularının (MOPH) ısı transfer mekanizmalarını incelemek ve ısı transfer kapasitelerini tahmin etmek amacıyla fiziksel ve matematiksel model oluşturmuştur. Simülasyonlar ANSYS Fluent yazılımında yapılmıştır. Çözüm modeli olarak Volume of Fluid (VOF) ve Mixture Model kullanılmış ve iki model karşılaştırılmıştır. Sonuçlar MOPH'da, mixture modelinin iki fazlı akış simülasyonları için daha uygun olduğunu göstermiştir.

Naveenkumar vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, farklı fitil kalınlıkları ve yapılarında ısı boruları tasarlanmıştır. Tasarlanan bu ısı boruları, ANSYS CFX programında modellenerek simüle edilmiştir. Isı borusu malzemesi olarak silika, fitil malzemesi olarak nikel alaşımı ve çalışma akışkanı olarak da su, metanol ve sıvı metanol kullanılmıştır. Her bir fitil yapısı, kalınlığı ve çalışma akışkanı için sıcaklık gradyanı ve ısı transfer katsayıları elde edilmiştir.

Dev ve Budania (2016) ısı borusunun kararlı hal performanslarını analiz etmek için iki boyutlu sonlu elemanlar metodunu geliştirmiştir. Geliştirdikleri modeli ANSYS Fluent yazılımında kullanmışlardır. Çalışmada, ısı borusu duvar malzemesi, fitil efektif ısı iletkenliği, ısı borusuna giren ısı akısı ve çalışma akışkanları gibi parametreleri değiştirilerek ısı borusu boyunca sıcaklık dağılımı belirlenmiştir.

Huang Vd. (2019) soğutucu plaka üzerindeki yivli bir ısı borusuna kanatçıklı yapı dahil ederek LED'in ısı transfer verimliliğini artırmaya çalışmışlardır. LED yoncası sıcaklığını güvenli bir çalışma aralığında koruyabilmek için ANSYS Fluent yazılımında ısı borusu parametreleri ve kanatçıklı yapı optimize edilmiştir. Çalışma sonucunda yüksek termal verimliliğin yeterli olmamasına rağmen LED jonksiyon sıcaklığında düşüş görülmüştür.

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

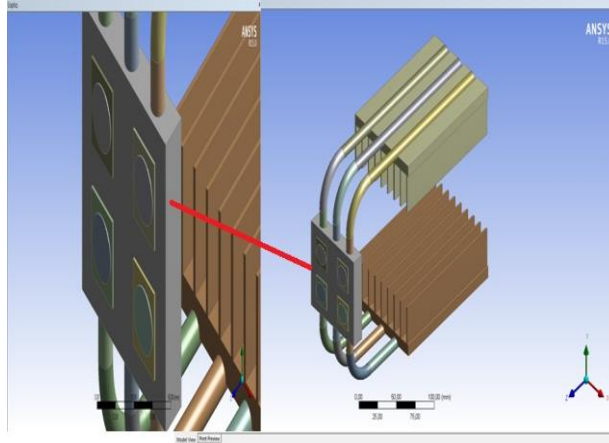
Yeni nesil yüksek güçlü LED'ler, oldukça kompakt boyutlara sahiptir. Bu durum, onlara kullanılabilirlik sağlamakla birlikte, birim hacim başına yüksek bir ısı akısı oluşması sorununu da beraberinde getirmektedir. Bu yüksek ısı akısı, LED'lerdeki jonksiyon sıcaklığında artışa neden olmaktadır. Oluşan yüksek sıcaklıklar, LED'lere zarar vererek faydalı ömürlerini kısaltmaktadır. Bu nedenle, LED'lerden ısıyı uzaklaştırarak, LED jonksiyon sıcaklığını izin verilen en büyük değerin altında tutmak önemlidir. Pratik kullanıma hazır her LED armatüründe, bu amaca yönelik bileşenler bulunmak zorundadır. Bu çalışmada, sokak aydınlatmalarında kullanılan yüksek güçlü LED'lerin soğutulması için, ısı borulu soğutucu tasarlanmıştır. LED'lerde oluşan ısı akısı, ilk olarak, üzerine monte edildiği alüminyum soğutucu plaka yardımıyla, yüksek ısı iletkenliğe sahip olan ısı borusuna aktarılır. Isı, buradan, çalışma akışkanının faz değişimi sonucu çekilerek, ısı borusu kondenser bölgesi üzerine yerleştirilen kanatçıklı soğutucu plakalara ve buradan da doğal taşınım yoluyla dış ortama geçiş yapar.

Tasarlanan sistem, sayısal olarak ANSYS Fluent yazılımında modellenmiş ve simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarını deneysel olarak doğrulamak için sistemin bir prototipi üretilmiştir. Deneysel çalışmada, LED'lere güç kaynağı yardımıyla enerji beslemesi sağlanmıştır. Sistem ısı dengeye geldikten sonra, hem K-tipi termokupullar hem de termal kamera ile sistemin farklı noktalarından sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Deneysel çalışmanın amacı, sayısal modelde elde edilen değerlerin, gerçek değerlere hangi oranlarda yaklaştığını görmektir.

#### 3.1. Sayısal Modelleme (Mathematical Model)

Isı borusu içindeki ısı transferi ve akışkan akışı çok karmaşık bir süreçtir. Buna bağlı olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde termal simülasyon bir çok faktöre bağlıdır. Geometrik modelin oluşturulması, fiziksel alana entegrasyonu, ağ yapısını oluşturma ve uygun bir sayısal hesaplama düzeni seçimi, simülasyon sürecinin başarı düzeyini belirleyebilen önemli faktörlerdir. Bu çalışmada tasarlanan sistemin termal analizi sayısal olarak Ansys 15.0 Fluent yazılımında yapılmış ve üç aşamada çözülmüştür.

Ön işlemede, LED'lerin ısı borulu soğutucu plakaya entegre edilmesiyle tamamlanan sistem, Ansys Workbench'te modellenmiştir. Sistemin geometrisi Şekil 1'de verilmiştir. Tasarlanan sistemde kullanılan dört adet 25 W'lık LED'lerin soğutulması için U-tipi silindirik bir ısı borusu kullanılmıştır. Isı borusu, üç adet bileşenden oluşmaktadır. Bunlar evaporatör, adyabatik ve kondenser bölgeleridir. Evaporatör bölgesi, ısıyı alıp kondenser bölgesine iletmek için kurulan bir mekanizmadır ve bu nedenle ısı üretiminin maksimum olduğu LED'in hemen altındaki alüminyum plakaya yerleştirilmiştir. Sistemden doğal taşınım ile maksimum miktarda ısı atılabilmesi için, ısı borusu kondenser bölgesine kanatçıklı alüminyum soğutucu plaka entegre edilmiştir.



**Şekil 1.** Tasarlanan Modelin Geometrisi (Geometry of The Designed Model)

LED'lerinin soğutulması için tasarlanan soğutucu plaka ve kanatçıkların özellikleri Tablo 1 'de, U-tipi silindirik ısı borusunun özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

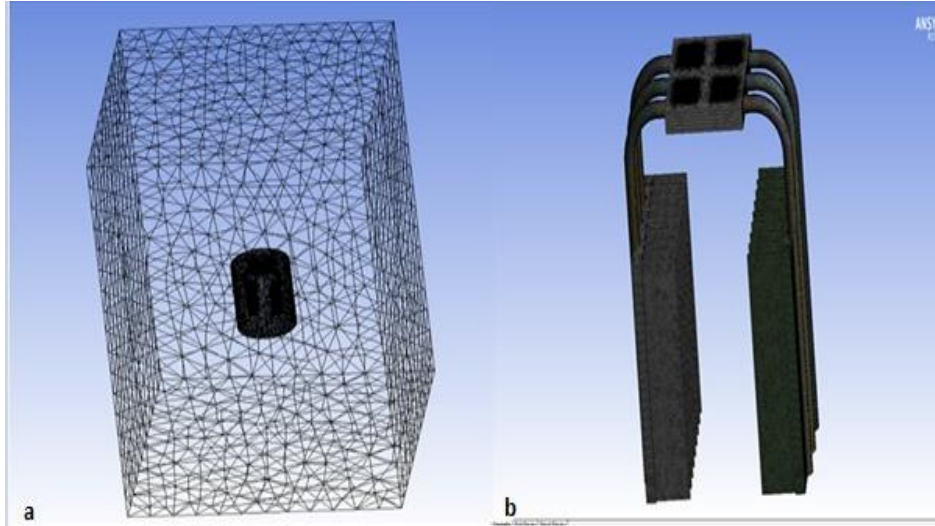
**Tablo 1.** Soğutucu Plaka ve Kanatçık Özellikleri (Properties of Heat Sink and Fins)

Parametre	Değer
Soğutucu plaka uzunluğu	0.150 m
Kanatçık genişliği	0.100 m
İki kanatçık arasındaki mesafe	0.012 m
Kanatçık yüksekliği	0.035 m
Kanatçık kalınlığı	0.001 m
Kanatçık sayısı	9

**Tablo 2.** Isı Borusunun Özellikleri (Properties of Heat Pipe)

Parametre	Değer
Toplam ısı borusu uzunluğu	0.58 m
Isı borusu kondenser uzunluğu	0.20 m
Isı borusu evaporatör uzunluğu	0.10 m
Isı borusu çapı (D)	0.010 m
Isı borusu malzemesi	Bakır
Toplam ısı girişi	100 W
Isı borusu ısı iletim katsayısı	10000 W/m.K
Çalışma akışkanı	Su

Geometri modellendikten sonra, sonlu elemanlar ağ yapısı oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar ağ yapısı oluşturulurken, üçgen elemanlardan oluşan bir ağ yapısı oluşturulmasına dikkat edilmiştir. Tasarlanan sistemde, iç içe iki akışkan alanı oluşturulmuştur. İçte oluşan akış alanında daha sık bir ağ yapısı oluşturulurken dıştaki akış alanında ağ yapısı daha seyrek oluşturulmuştur. Ağ yapısı oluşturma işlemi sonunda, model üzerinde 5643861 eleman ve 1305380 düğüm noktası meydana gelmiştir. Ağ yapısı oluşturulurken minimum eleman boyutu 0.20 mm olarak seçilmiş ve *Skewness* faktörünün 0.96'nın altında olması sağlanmıştır. Oluşturulan ağ yapısının detaylı resimleri Şekil 2 de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Tasarlanan Sistemin a. Akış Alanı İle Birlikte, b. Akış Alanı Hariç Ağ Yapısı (Mesh Structure of Designed System a. With Flow Area b. Without Flow Area)

Çözümde *Couple* çözüm metodu, akış modeli olarak da *Turbulent Mixing Length* modeli kullanılmıştır. Modeli tanımlarken enerji denklemleri açık tutulmuş ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinde kullanılan üç adet denklem kullanılmıştır. Bunlar süreklilik, momentum ve enerji denklemleridir. Bu üç denkleme genel olarak *Navier-Stokes* denklemleri adı verilir. Akıştaki çoğu akışkanın genel olarak matematiksel olarak çözümü son iki denklemde gerçekleşir. Bu üç denklem sırasıyla Eşitlik (1-5)'de gösterilmiştir.

#### Süreklilik denklemi

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

#### Momentum denklemi

##### x-yönü

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

##### y-yönü

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

##### z-yönü

$$\rho \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

#### Enerji denklemi

$$\left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{\alpha} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

### 3.2. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

Deneysel çalışma için, iç ve dış çapları sırasıyla 0.3 mm ve 10 mm olan U şeklinde üç adet bakır ısı borusu imal edilmiştir. Isı borularının evaporatör bölgeleri, 80 x 80 mm'lik bir soğutucu plakanın içinden geçecek şekilde monte edilmiştir. Sonrasında, LED'ler, oluşan ısının iletilmesi için, bu soğutucu plakanın üzerine yerleştirilmiştir. Isı borularının kondenser bölgelerine alüminyum soğutucu plakalar monte edilmiştir. Bu soğutucu plakaların üzerine, ısı transfer yüzey alanını artırmak için, kanatçıklı yapılar yerleştirilmiştir. Kanatçıklı yapıların profili dikdörtgen şeklinde olup, 35 mm kalınlığında ve 2 mm genişliğindedir. Isı borularının içinde, kapiler etkiyi ve ısıl iletkenliği sağlaması için Sinterlenmiş Metal Fital yapısı kullanılmıştır. Sinterlenmiş Metal Fital yapısı, metal partiküllerinin kalıplarda preslenerek şekillendirilmesi ve fırınlarda sinterlenmesi ile oluşturulmaktadır. Isı borularında, dış duvar malzemesi olarak, ısı iletim katsayısı oldukça yüksek olan bakır, çalışma akışkanı olarak da saf su kullanılmıştır.

Bu çalışmada, ısı borulu soğutucu plakaya monte edilmek üzere, 25 W'lık dört adet *Lumileds Luxeon 1208* model COB LED kullanılmıştır. COB LED'lere enerji beslenebilmesi için LED'lere lehim yoluyla bağlantı yapılmıştır. Lehim yaparken lehim sıcaklığının 300 °C'yi geçmemesine ve enerji beslemesi yapılırken (kablolardan yüksek oranda akım geçeceğinden) çok ince kablolarla bağlantı yapılmamasına dikkat edilmiştir. LED'leri çalıştırmak için paralel bağlama yapılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. LED'lerin Elektriksel Bağlantısı ( Electrical Connection of LEDs)

Tasarımda kullanılan LED'in özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. LED yongası ve baskılı devre kartından (PCB) oluşan LED ile soğutucu plaka arasında termal ara yüzey malzemesi bulunmaktadır. Elektriksel bağlantısı yapılan LED'lerin çalıştırılması için, 60 volt gerilim ve 5 amper akıma kadar güç sağlayan TT-T-ECNİ-C RXN 605D model ayarlanabilir güç kaynağı kullanılmıştır.

**Tablo 3.** LED ve Soğutucu Plakanın Boyutları ve Termal İletkenlikleri (Dimensions and Thermal Conductivities of LEDs and Heat Sink)

	Genişlik (mm)	Boyut (mm)	Malzeme	Termal İletkenlik (W/m.K)
<b>LED Yongası</b>	0.5	R=17.5	GaN	130
<b>Elektronik Devre Kartı</b>	1	20x24	PCB	24
<b>TIM</b>	0.05	"	Termal ara yüzey malzemesi	8
<b>Soğutucu Plaka</b>	15	80x80	Alüminyum 6061	202

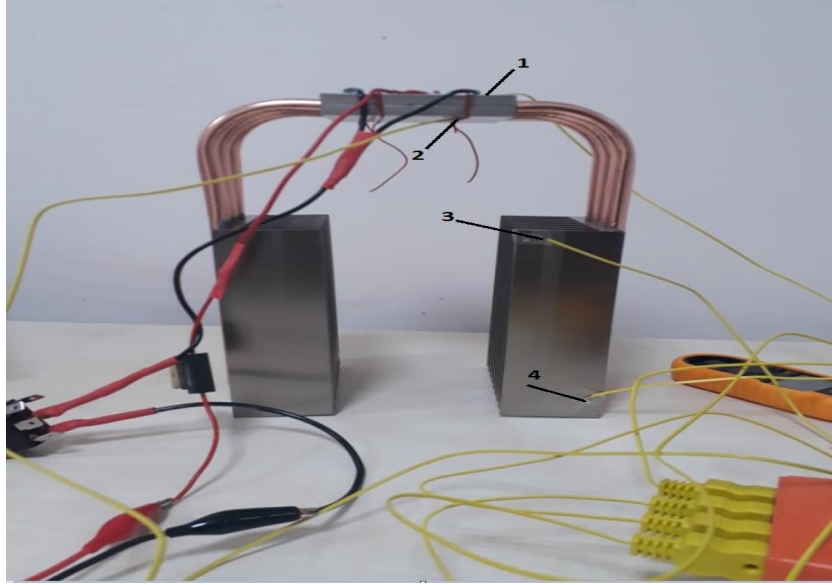
Lumileds Luxeon 1208 COB LED'lerin veri föyündeki (URL-1) gerilim ve akım diyagramından faydalanılarak, her bir LED'te 25 W'lık güç elde etmek için, yaklaşık 0.720 mA akım ve 34.5 V'luk bir gerilim uygulanmıştır. LED'ler paralel bağlı olduğu için, güç kaynağından çıkacak akım değeri, LED'lere uygulanacak akım değerlerinin toplamına eşit olacaktır. Bu nedenle, dört eş LED için toplam akım değeri  $0.720 \times 4 = 2.880$  Amper olarak belirlenmiştir. Paralel bağlı dirençlerde gerilim değerleri eşit olduğundan, gerilim değeri 34.5 V olarak ayarlanmıştır.

Elektronik soğutmada, içinde ısı üretimi olan elektronik bileşen ile soğutucu plaka arasında bulunan hava boşlukları, elektronik bileşenden soğutucu plakaya ısı geçişini olumsuz etkiler. LED ile soğutucu plaka arasındaki ara yüzeyin oluşturduğu ilave termal direnci azaltmak için, termal ara yüzey malzemesi kullanılır. Termal ara yüzey malzemeleri, termal olarak iletken olan polimer veya silikon matris parçacıklardan oluşur (Gwinn ve Webb, 2003). Orta derecede bir iletkenlik sağlayabilmek için gerekli termal ara yüzey malzeme kalınlığı, kullanım yerine göre, 2 ile 25 nm arasında değişir (Schelling, 2005).

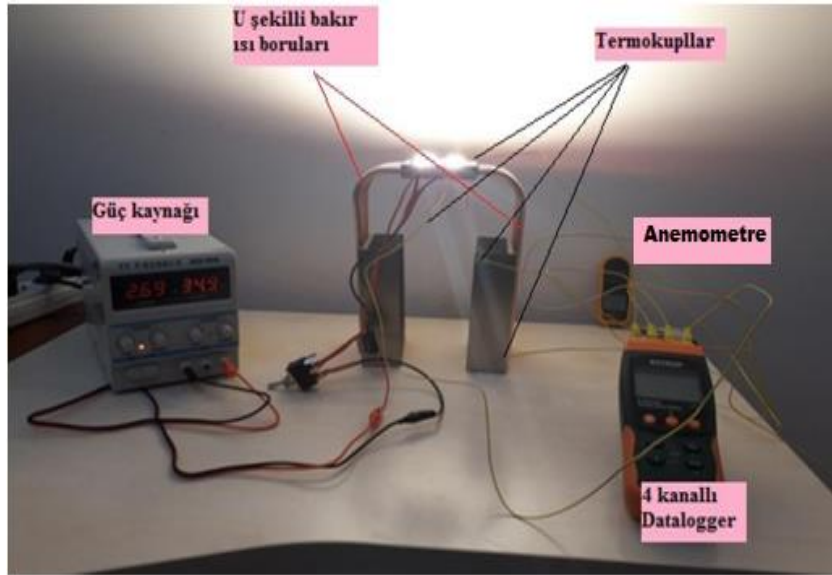
DeneySEL çalışmada, soğutucu plaka üzerine LED'ler monte edilirken, 8 W/m.K'lik ısı iletkenliğe sahip termal macun kullanılmıştır. Termal macunun her bir LED'in yüzeyine ince bir tabaka halinde homojen olarak sürülmesine dikkat edilmiştir. Sistemi çalıştırırken, olası bir akım artışının LED'lere olumsuz etki etmemesi için, elektriksel devreye 3 amperlik bir bıçak sigorta ve bir açma-kapama düğmesi (olası bir tehlike durumunda erken müdahale edebilmek için) yerleştirilmiştir.



Sıcaklık ölçümleri için 4 adet K tipi termokupl kullanılmıştır. Sıcaklık ölçüm değerlerini belirli zaman aralıklarıyla kaydetmek için, termokupllar, Extech SDL200 marka veri toplayıcısına bağlanmıştır. LED'lere güç verildikten sistemin ısıl dengeye gelmesi beklenmiştir. Şekil 4'de gösterilen noktalara monte edilen termokupllar sayesinde sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Ölçümler yapılırken ortam sıcaklığı  $24.7 \pm 0.3$  °C (termometre ölçümü) ve hava hızı 0.1 m/s (anemometre ölçümü) olarak belirlenmiştir. Şekil 5'te deney düzeneğinin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 4. Termokupl Ölçüm Noktaları (Thermocouple Measuring Points)

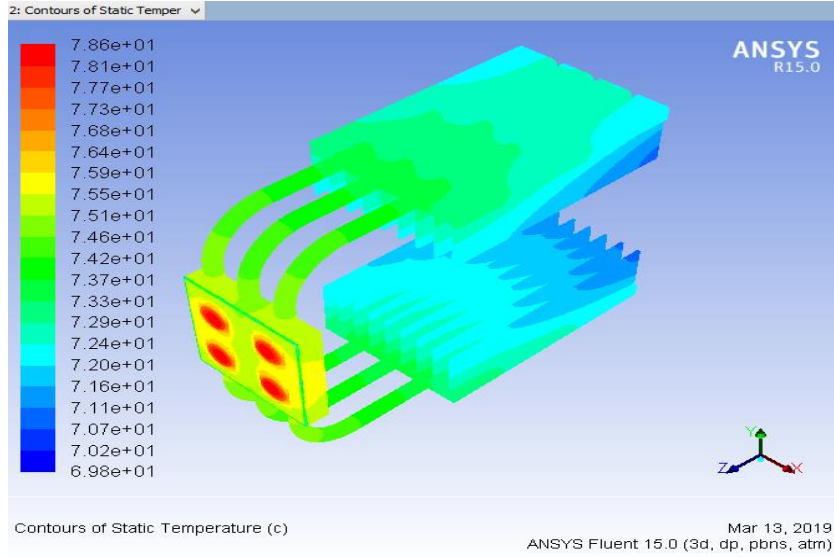


Şekil 5. Deney Düzeneğinin Görüntüsü (View of Experimental Set Up)

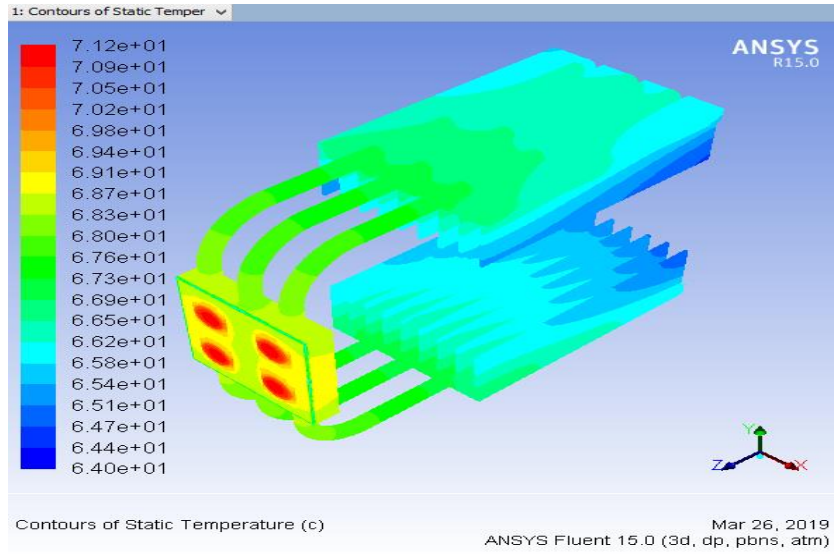
#### 4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

##### 4.1. Sayısal Modelleme Sonuçları (Numerical Modeling Results)

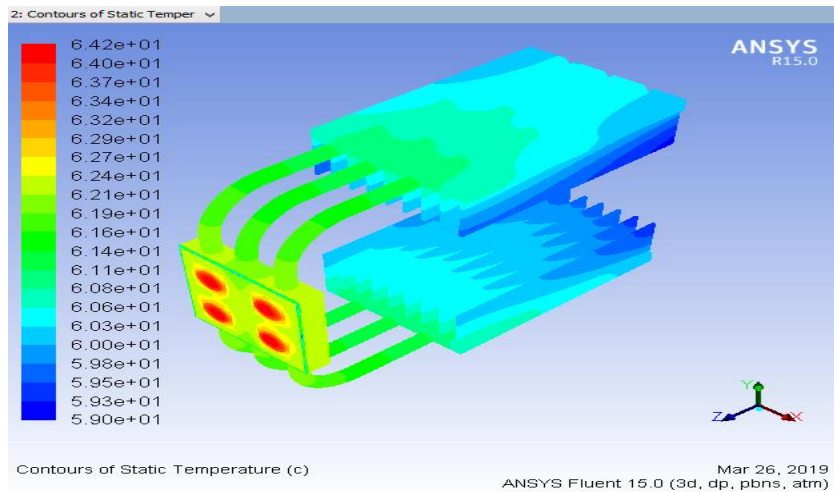
ANSYS Fluent yazılımında, verilen sınır koşulları altında, modelin termal analizi farklı güç girişleri için gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 4500 iterasyon sonucunda modelin yakınsadığı görülmüştür. Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de sırasıyla 15 W, 20 W ve 25 W'lık güç girişleri için elde edilen sıcaklık dağılımları verilmiştir. Buna göre, 25 W'lık güç girişi için 78.6 °C, 20 W'lık güç girişi için 71.2 °C ve 15 W'lık güç girişi için 64.2 °C maksimum sıcaklık değerleri elde edilmiştir. LED'lere uygulanan güç girişi azaldıkça, sistemin maksimum sıcaklığında düşüş gözlenmiştir.



**Şekil 6.** 25 W'lık elektriksel giriş gücü için tasarlanan sistemin verilen geometri ve sınır şartlarında sıcaklık dağılımı (Temperature Distribution of The Designed System in Given Geometry and Boundary Conditions for 25 W Electrical Input Power)



**Şekil 7.** 20 W'lık elektriksel giriş gücü için tasarlanan sistemin verilen geometri ve sınır şartlarında sıcaklık dağılımı (Temperature Distribution of The Designed System in Given Geometry and Boundary Conditions for 20 W Electrical Input Power)



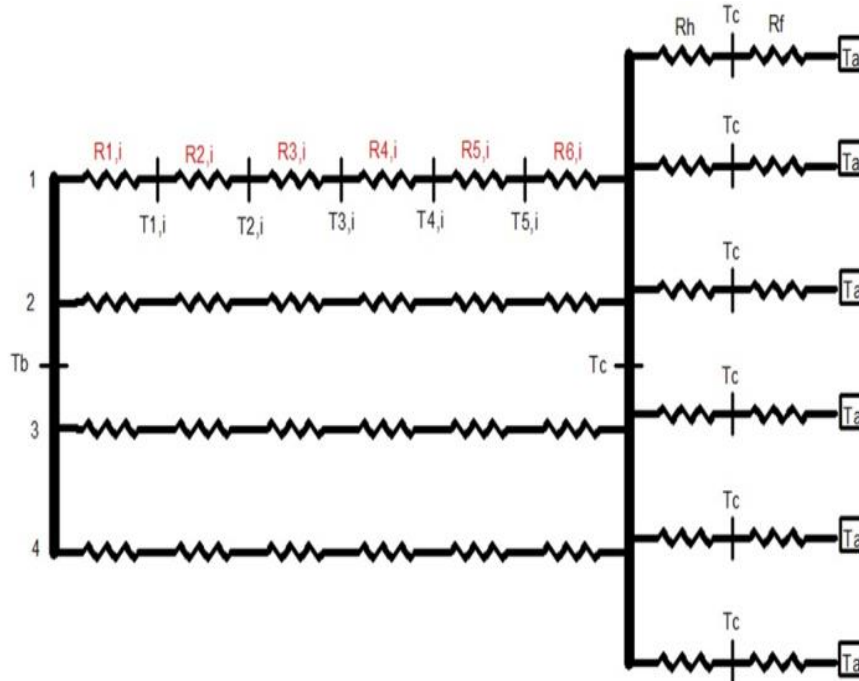
**Şekil 8.** 15 W'lık elektriksel giriş gücü için tasarlanan sistemin verilen geometri ve sınır şartlarında sıcaklık dağılımı (Temperature Distribution of The Designed System in Given Geometry and Boundary Conditions for 15 W Electrical Input Power)

Şekil 9'da termal direnç ağ modeli verilen sistemde, maksimum LED sıcaklığı,  $T_b$ , evaporatör bölgesi sıcaklığı,  $T_c$ , kondenser bölgesinin ortalama sıcaklığı,  $T_a$  olarak ifade edilmiştir. Sistemin toplam termal direnci hesaplanırken sistem iki alt sisteme ayrılmış ve LED'den soğutucu plakaya kadar olan kısmın toplam termal direnci  $R_{th1}$  olarak, ısı borusu ve kanatçıkları kapsayan diğer kısmın toplam termal direnci ise  $R_{th2}$  olarak tanımlanmıştır. Sistemin toplam termal direnci Eşitlik (6)'daki gibi hesaplanır.

$$R_{th} = R_{th1} + R_{th2} \quad (6)$$

$$R_{th1} = \left( \sum_{i=1}^4 \frac{1}{R_{LEDi}} \right)^{-1} \quad (7)$$

$$R_{th2} = \left( \sum_{i=1}^6 \frac{1}{R_{h,i} + R_{f,i}} \right)^{-1} \quad (8)$$



Şekil 9. Tasarlanan Sistemin Termal Direnç Ağ Şeması (Thermal Resistance Network of The Designed System)

LED'lerde jonksiyon sıcaklığı oldukça önemli bir parametredir çünkü LED ömrü ve ışık akısı gibi parametreler büyük ölçüde jonksiyon sıcaklığına bağlıdır. LED jonksiyon sıcaklığı, Eşitlik (9)'daki gibi hesaplanır. Eşitlikte verilen  $I_F$ , ileri yönde akımı,  $V_F$  ise ileri yönde gerilimi ifade eder. Jonksiyon sıcaklığını hesaplamak için, sistemin toplam termal direnci bilinmelidir.

$$T_j = T_a + R_{th} \times I_F \times V_F \quad (9)$$

ANSYS Fluent yazılımında yapılan analizler sonunda, sistemin belirli noktalardan sıcaklık değerleri alınmıştır. Her bir güç girişi için hesaplanan toplam termal direnç ve jonksiyon sıcaklık değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Farklı Elektriksel Güç Girişleri için Toplam Termal Direnç ve Jonksiyon Sıcaklık Değerleri (Values of Total Thermal Resistance and Junction Temperature for Different Electrical Power Inputs)

Elektriksel Güç Girişi (W)	Toplam Termal Direnç (°C/W)	Jonksiyon Sıcaklığı (°C)
25	0.546	89.6
20	0.566	80.3
15	0.608	71.5

Literatürde U-tipi silindirik ısı borusunun elektronik soğutmada kullanılmasıyla ilgili çalışmalar mevcuttur. Elnaggar vd. (2011)'in 24 W güç girişi için üç adet U-tipi silindirik ısı borusu kullandığı çalışmada toplam termal direnç değeri 0.441 °C/W olarak bulunmuştur. Chang-Wang (2014), yaptığı çalışmada iki adet U-tipi silindirik ısı

borusu zorlanmış taşınım (fanlı soğutma) koşullarında kullanmıştır.  $15 \times 15 \text{ mm}^2$  lik ısı kaynağına girilen 60 W, 80 W ve 100 W'lık güç girişleri için toplam termal direnç değerleri sırasıyla  $0.63 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ,  $0.62 \text{ }^\circ\text{C/W}$  ve  $0.615 \text{ }^\circ\text{C/W}$  olarak verilmiştir. Buna göre ısı kaynağına verilen güç arttıkça toplam termal direnç değerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu çalışmada bulunan sonuçlar da aynı durumu işaret etmektedir. Mevcut çalışmada fan kullanmadan, doğal taşınım koşullarında, kabul edilebilir termal direnç değerlerinin elde edildiği görülmüştür.

#### 4.2. Farklı Türbülans Modelleri ve Duvar Yaklaşımlarının Maksimum Sıcaklığa Etkisi (Effect of Different Turbulence Models and Wall Approaches on Maximum Temperature)

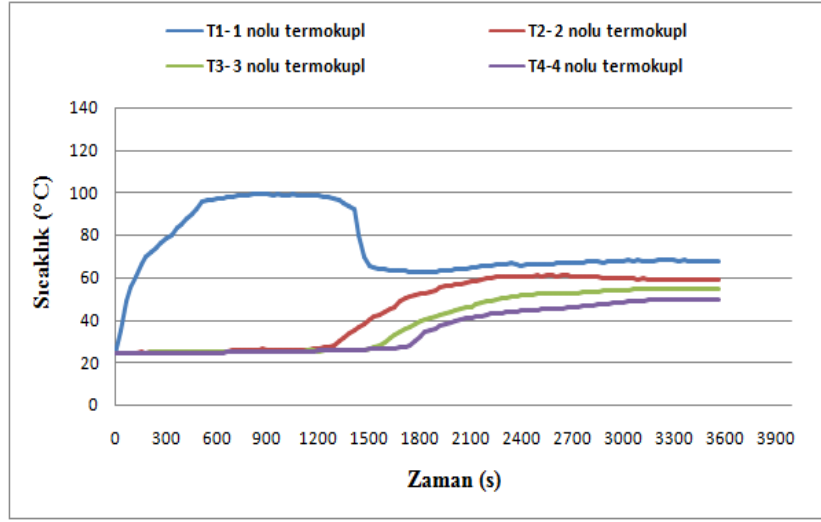
Duvar fonksiyonları, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde yaygın olarak kullanılır ve hesaplamalarda oldukça kolaylık sağlar. Tasarlanan sistemin termal analizlerinde, türbülans modeli olarak *Turbulent Mixing Length* modeli kullanılmıştır. Çalışmada ek olarak başlangıç ve sınır değerleri değiştirilmeden, *Standart k- $\epsilon$* , *Rng-k- $\epsilon$* , *Realizable k- $\epsilon$* , *Standart k-w* ve *SST-k-w* gibi türbülans modelleri, *Standart Wall Function*, *Enhanced Wall Treatment* ve *Non Equilibrium Wall Function* gibi farklı duvar yaklaşımlarıyla birlikte uygulanmış ve maksimum LED sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Farklı türbülans modeli ve duvar yaklaşımları ile yapılan analizler sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri Tablo 5'de verilmiştir.

**Tablo 5.** Türbülans Modeli ve Duvar Yaklaşımlarına Göre Maksimum LED Sıcaklık Değerleri (Maximum LED Temperature Values for Turbulence Model and Wall Approaches)

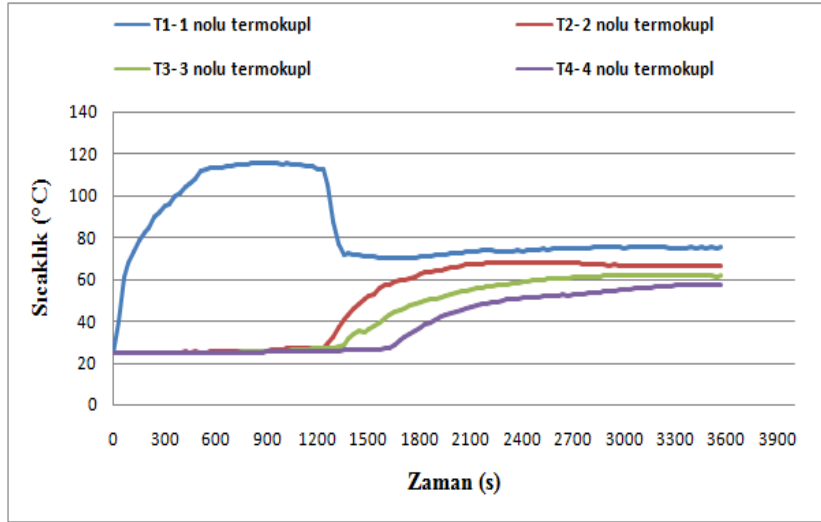
Türbülans Modeli	Duvar Yaklaşımı	Maksimum LED Sıcaklığı (°C)
<b>Turbulent Mixing Length</b>	-	78.6
<b>Standart k-<math>\epsilon</math></b>	Standard Wall Function	81.5
	Enhanced Wall Treatment	83.8
	Non Equilibrium Wall Function	75.5
<b>Rng-k-<math>\epsilon</math></b>	Standard Wall Function	83.7
	Enhanced Wall Treatment	84.4
	Non Equilibrium Wall Function	84.5
<b>Realizable k-<math>\epsilon</math></b>	Standard Wall Function	84.0
	Enhanced Wall Treatment	83.9
	Non Equilibrium Wall Function	76.8
<b>Standart k-w</b>	-	83.8
<b>SST-k-w</b>	-	84.7

#### 4.3. Deneysel Çalışma Sonuçları (Experimental Results)

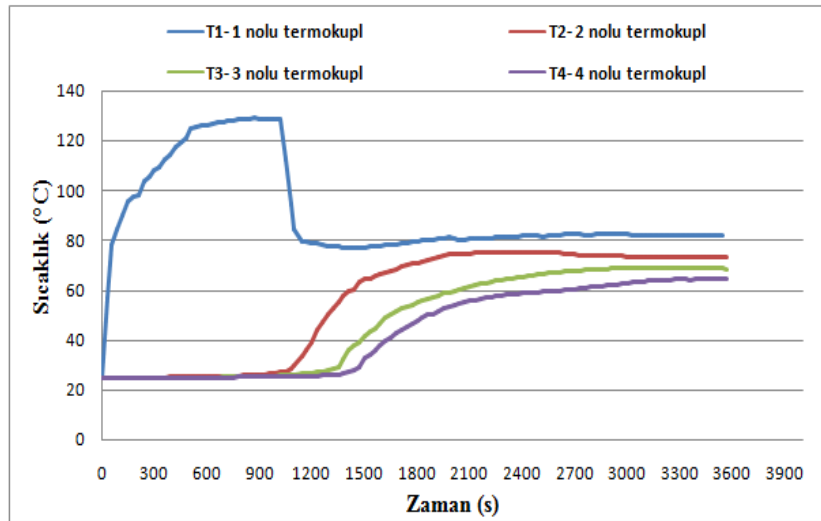
Sistem sıcaklık verileri, SDL 200 EXTECH marka veri toplayıcısına bağlanan 4 adet K-tipi termokupl tarafından alınmıştır. Bu 4 termokupl, sistemde Şekil 4'de belirtilen noktalara monte edilmiştir. Sistemin sıcaklık ölçümleri 60 dakika boyunca devam etmiş ve 30 saniye aralıklarla kaydedilmiştir. Kayıt işlemi bittikten sonra, veri toplayıcısı SD kartını bilgisayara bağlayarak veriler Excel programına aktarılmıştır. Daha sonra, bu veriler kullanılarak, her bir güç girişi için Şekil 10-12'de verilen sıcaklık-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Buna göre  $T_1$ , LED maksimum sıcaklığı,  $T_2$ , içinde ısı borusu evaporatör kısmı bulunan soğutucu plakanın alt bölge sıcaklığı,  $T_3$  ve  $T_4$ , kanatçıklı alüminyum plakanın üst ve alt bölgelerinin sıcaklık değerleridir.  $T_1$  noktasının sıcaklığı ilk olarak hızlı bir artış gösterip daha sonra ısının, sistemin alt kısımlarına doğru aktarılması ile bir miktar azalmaktadır.  $T_2$ ,  $T_3$  ve  $T_4$  noktası sıcaklıkları, sistem çalıştıktan sonra LED'den kanatçıklara doğru ısı aktarımı gerçekleştikçe artmakta ve zamanla stabil hale gelmektedir.



Şekil 10. 15 W'lık Elektriksel Güç Girişi İçin Sistemde Belirlenen Noktaların Zamana Göre Sıcaklık Dağılımı (Temperature Distributions of Specified Points with Respect to Time, 15 W Electrical Power Input)



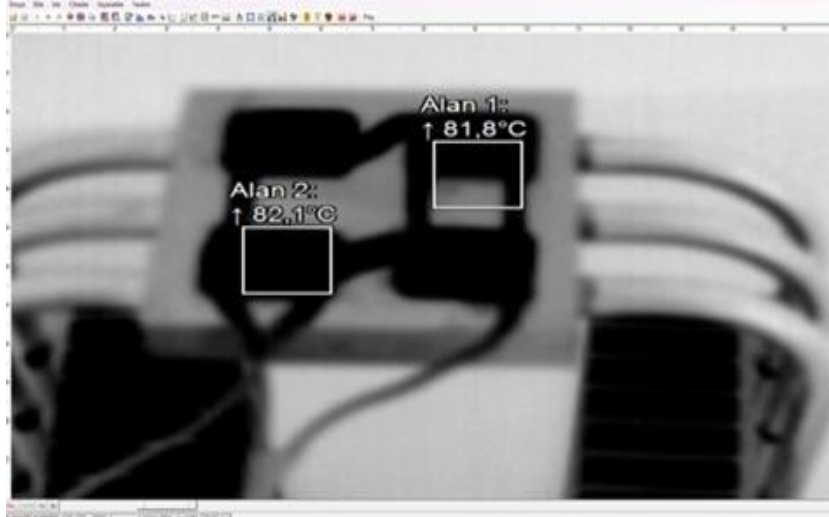
Şekil 11. 20 W'lık Elektriksel Güç Girişi İçin Sistemde Belirlenen Noktaların Zamana Göre Sıcaklık Dağılımı (Temperature Distributions of Specified Points with Respect to Time, 20 W Electrical Power Input)



Şekil 12. 25 W'lık Elektriksel Güç Girişi İçin Sistemde Belirlenen Noktaların Zamana Göre Sıcaklık Dağılımı (Temperature Distributions of Specified Points with Respect to Time, 25 W Electrical Power Input)

Sistemin sıcaklık ölçümlerini doğrulamak için termal kamera kullanılmıştır. Ölçümler,  $160 \times 120$  piksel çözünürlüğe sahip Optris PI termal kamera ile yapılmıştır. Sistem kararlı hale geldikten sonra, LED'lerin

maksimum sıcaklık değerleri termal kamera ile ölçülmüştür. Termal kamera ile termokupplardan alınan değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Şekil 13'de, 25 W'lık güç girişi için termal kamera ile ölçülen LED sıcaklık değeri verilmiştir.



Şekil 13. 25 W'lık Elektriksel Güç Girişi için Sistemin Termal Kamera ile Sıcaklık Ölçümü (Temperature Measurement of the LEDs with Thermal Camera for 25 W Electrical Power Input)

#### 4.4. Deneysel Belirsizlik (Experimental Uncertainty Analysis)

Deneysel belirsizlik, temel olarak sıcaklık ölçüm sürecinin rassal hatası olarak tanımlanır. Belirsizliklerin, elektriksel güç girişi ve sıcaklık ölçümlerindeki değişimlerden ve kalibrasyonlardaki hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Termokuppların ölçüm hassasiyeti  $\pm 0.1$  °C dir. Bu nedenle, sıcaklık ölçümünün mutlak belirsizliği  $dT$ , 0.1 °C olarak alınmıştır. DC güç kaynağında okunan gerilim değerinin verdiği hata ( $dU$ ),  $\pm 0.5$  Volt, akım değerinin verdiği hata ( $dI$ ),  $\pm 0.5$  Amper ve SD kart çözünürlüğünün verdiği hata ( $dT_{data}$ ),  $\pm 0.1$  °C olarak belirlenmiştir. Sıcaklık ölçüm belirsizliği ( $U_T$ ), tüm belirsizlikler göz önünde bulundurularak, Eşitlik (10)'daki gibi ifade edilir (Kline, 1985). Burada  $T_{ave}$ , her sıcaklık ölçüm noktasının ortalama değerini belirtir. Hesaplamalar sonucu belirsizlik değerinin % 1.5'dan % 2.2'ye kadar değiştiği görülmüştür.

$$U_T = \sqrt{\left(\frac{dT}{T_{ave}}\right)^2 + \left(\frac{dT_{data}}{T_{ave}}\right)^2 + \left(\frac{dU}{U}\right)^2 + \left(\frac{dI}{I}\right)^2} \quad (10)$$

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

Bu çalışmada, sokak aydınlatmalarında kullanılan yüksek güçlü LED'lerin soğutulması için ısı borulu soğutucu plaka tasarlanmıştır. Isı borulu soğutucu plaka üzerine yüksek güçlü dört eş COB LED'in yerleştirilmesiyle tamamlanan sistemin termal analizi, sayısal olarak ANSYS Fluent yazılımında yapılmıştır. Analizler, 15 W, 20 W ve 25 W'lık elektriksel güç girişleri için başlangıç ve sınır koşulları değiştirilmeden tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlarla, LED'lere uygulanan farklı güç girişlerinin, LED maksimum sıcaklığına etkisi karşılaştırılmıştır. Buna göre, LED'lere uygulanan 15 W, 20 W ve 25 W'lık güç girişleri için, LED maksimum sıcaklıkları, sırasıyla 64.2 °C, 72.1 °C ve 78.6 °C olarak bulunmuştur. Analiz sonuçları, hesaplanan jonksiyon sıcaklıklarının izin verilen değerlerin altında kaldığını ve tasarlanan sistemin LED'leri soğutmak için yeterli olduğunu göstermiştir. ANSYS Fluent yazılımında analizler yapılırken, Türbülans modeli olarak *Turbulent Mixing Length* kullanılmıştır. Bu çalışmada ek olarak başlangıç ve sınır şartları değişmeden farklı türbülans modeli ve duvar yaklaşımları kullanılarak LED maksimum sıcaklığına etkisi de incelenmiştir. Analizlerde kullanılan 6 farklı türbülans modeli ve 3 farklı duvar yaklaşımı sonucunda LED maksimum sıcaklıklarında gözle görülür farklılıklar olduğu görülmüştür. Aynı türbülans modelinde farklı duvar yaklaşımları kullanıldığında, maksimum LED sıcaklık değerleri arasında yaklaşık 8 °C'ye kadar değişim gözlenmiştir.

Deneysel çalışma, yapılan sayısal analizlerin doğrulanması ve tasarlanan model için en uygun türbülans modeli ve duvar yaklaşımının belirlenebilmesi için yapılmıştır. Sistem kararı hale geldikten sonra ölçümler hem K-tipi termokuppları ile hem termal kamera ile yapılmıştır. Deneysel ölçüm sonuçları ise, aynı güç girişleri için, aynı sırayla, 68 °C, 74.4 °C ve 82.2 °C olarak ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar ile analiz sonuçları arasındaki en büyük hata %5.92, korelasyon katsayısı ise 0.9992 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, sayısal modelin, tasarlanan



sistemi yeterli bir doğrulukla simüle ettiği söylenebilir. Deneysel ölçümler sonucunda tasarlanan model için en iyi sonuç, *Standart k-ε* türbülans modeli ve *Standard Wall Function* duvar yaklaşımında elde edilmiştir.

### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, 15.02.2019 tarihli, 540357 numaralı, "M1 ve M2 kategorisinde tanımlanan yol aydınlatma sınıflarına uygun ve yüksek verimli LED'li yol aydınlatma armatür modellerinin tasarımı ve termal analizi" başlıklı doktora tez çalışmasından derlenmiştir.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

### Kaynaklar (References)

- Ashish, R., Chaudhari, Bhosale, S.Y., 2016. CFD Validation and Experimental Investigation of Circular Heat Pipe Using Hybrid Nanofluid, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5, 9, 16058-16064.
- Asmaie, L., Haghshenasfard, M., Mehrabani-Zeinabad, A., Esfahany, M.N., 2013. Thermal Performance Analysis of Nanofluids in a Thermosyphon Heat Pipe Using Cfd Modeling, *Heat and Mass Transfer*, 49, 5, 667-678.
- Cai, Y., Li, Z., Zhai, J., Tang, Y., Yu, B., 2017. Experimental Investigation On a Novel Multi-Branch Heat Pipe for Multi-Heat Source Electronics, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 467-477.
- Dev, K., Budania, B., 2016. Simulation and Modeling Of Heat Pipe, *International Journal of Technical Research*, 5,1.
- Elnaggar, M. H., Abdullah, M. Z., Mujeebu, M. A. 2011. Experimental analysis and FEM simulation of finned U-shape multi heat pipe for desktop PC cooling, *Energy Conversion and Management*, 52(8-9), 2937,2944.
- Elnaggar, M., 2013. The Effect Of Thickness and Permeability of Wick Structure on L-Shape Heat Pipe Performance Using Different Working Fluids, *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*, 3, 4.
- Gwinn, J.P., Webb, R.L., 2003. Performance and Testing of Thermal Interface Materials, *Microelectron Journal*, 34, 215-22.
- Huang, D. S., Chen, T. C., Tsai, L. T., Lin, M. T., 2019. Design of Fins with a Grooved Heat Pipe for Dissipation of Heat From High-Powered Automotive LED Headlights, *Energy Conversion and Management*, 180, 550-558.
- Kline, S.J., 1985. The Purposes Of Uncertainty Analysis, *Journal of Fluids Engineering*, 107, 2, 153-160.
- Lin, Z., Wang, S., Shirakashi, R., Zhang, L.W., 2013. Simulation of a Miniature Oscillating Heat Pipe in Bottom Heating Mode Using Cfd with Unsteady Modeling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57, 2, 642-656.
- Moon, S. H., Park, Y. W., Yang, H. M., 2016. A Single Unit Cooling Fins Aluminum Flat Heat Pipe for 100 W Socket Type COB LED Lamp, *Applied Thermal Engineering*, 126, 1164-1169.
- Naveenkumar, C., Kumar, P.V., Kumar, K.D., 2015. Simulation and CFD Analysis of Heat Pipe With Different Wick Geometry Using CFX, *International Journal of Thermal Technologies*, 5, 3, 210-213.
- Pimputkar, S., Speck, J.S., Denbaars, S.P., Nakamura, S., 2009. Prospects for Led Lighting, *Nat. Photonics*, 2, 180-182.
- Schelling, P.K., Shi, L., Goodson, K. E., 2005. Managing Heat for Electronics, *Materials Today*, 8, 6, 30-35.
- Schmid, G., Huang, Z.L., Yang, T.H., Chen, S.L., 2017. Numerical Analysis of a Vertical Double-Pipe Single-Flow Heat Exchanger Applied in an Active Cooling System for High-Power Led Street Lights, *Applied Energy*, 195, 426-438.
- Suresh, Z.V., Bhramara, B., 2016. Cfd Analysis of Single Turn Pulsating Heat Pipe, *International Journal Of Scientific And Engineering Research*, 7, 6, 238-244.
- Tang, Y., Ding, X., Li, Z., Li, B., 2014. A High Power Led Device with Chips Directly Mounted on Heat Pipes, *Applied Thermal Engineering*, 66, 632-639.
- Wang, J. C., 2014. U-and L-shaped heat pipes heat sinks for cooling electronic components employed a least square smoothing method, *Microelectronics Reliability*, 54(6-7), 1344,1354.
- Wang, M., Tao, H., Sun, Z., Zhang, C., 2017. The Development and Performance of the High Power Led Radiator, *International Journal Of Thermal Sciences*, 113, 65-72.
- URL-1 < <https://www.lumileds.com/uploads/419/DS115-pdf/> >: (Erişim tarihi: 12.02.2019).



## OLASILIK TABANLI YAKLAŞIM KULLANARAK METAL ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE GERİ YAYLANMA, BURUŞMA VE İNCELME PROBLEMİNİ EN AZA İNDİRECEK YENİ BİR TASARIM METODOLOJİSİ

Oğuz KAYABAŞI\*

Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Metal Şekillendirme,  
Optimizasyon Teknikleri,  
Sonlu Elemanlar Analizi,  
Monte Carlo Simülasyonu.*

### Öz

Saç metal prosesinde, geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azalması en yaygın sorunlardan biri haline gelmiştir. Bu çalışmada, otomobil yan panelinde geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azalmasını en aza indirmek için üç yaklaşım önerilmiştir. İlk yaklaşımda, çift pot çemberi kullanılmasının geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azaltma üzerindeki etkisi incelenmiştir. İkinci yaklaşımda, otomobil panelinin şekillendirilebilirliğinin daha da iyileştirilmesinde optimizasyon yönteminin kullanımı incelenmiştir. Optimizasyon yöntemiyle, en uygun şekillendirme özellikleri için şekillendirme işlemi parametrelerinin en uygun değerleri hesaplanmıştır. Optimum değerleri bulmada Sonlu Elemanlar Analizi, Tepki Yüzey Metodolojisi ve Genetik Algoritma birleştirilmiştir. Etkili entegrasyon sağlamak için bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bu çalışma çift pot çemberinin kullanımı biçimlendirilebilirliği önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. Üçüncü yaklaşımda olasılıksal tasarım yöntemi Monte Carlo Simülasyonu, otomatik bir tasarım aracı oluşturmak için entegre edilmiştir, Sonuçların güvenilirliği, olasılıksal tasarım teknikleri kullanılarak kontrol edilmiş ve iyileştirilmiştir.

## A NOVEL DESIGN TO MINIMIZE SPRINGBACK, WRINKLING AND THICKNESS REDUCTION PROBLEM IN SHEET METAL FORMING PROCESS USING PROBABILISTIC APPROACH

### Keywords

*Sheet Metal Forming,  
Optimization Techniques,  
Finite Element Analysis,  
Monte Carlo Simulation.*

### Abstract

In the sheet metal process, springback, wrinkling and thickness reduction have become one of the most common problems. In this study, three approaches are proposed to minimize springback, wrinkling and thickness reduction for automobile side panel, In the first approach, the effect of using double binder on springback, wrinkling and thickness reduction is studied, In the second approach, the use of optimization method in further improving formability of the automobile panel is investigated, With the optimization method, the most appropriate values of forming process parameters are calculated for optimum formability characteristics, Positions of the upper die and draw-bead, draw-bead radius, forces applied on the upper die surface and double binder surfaces are considered as process parameters, In finding optimum values, Finite Element Analysis, Response Surface Methodology and Genetic Algorithm are integrated, To achieve efficient and effective integration, a computer program is written, From this study it is observed that double binder with an appropriate stamping force improves formability significantly, Application of optimization method also improves further formability characteristics of the automobile panel, In the third approach probabilistic design method Monte Carlo Simulation are integrated to create an automated design tool, The reliability of the results are checked and refined by using probabilistic design techniques

### Alıntı / Cite

Kayabaşı, O. (2020). Olasılık Tabanlı Yaklaşım Kullanarak Metal Şekillendirme İşleminde Geri Yaylanma, Buruşma Ve İncelme Problemini En Aza İndirecek Yeni Bir Tasarım Metodolojisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 198-209.

\* İlgili yazar / Corresponding author: oguzkayabasi@duzce.edu.tr, +90-380-542-1036



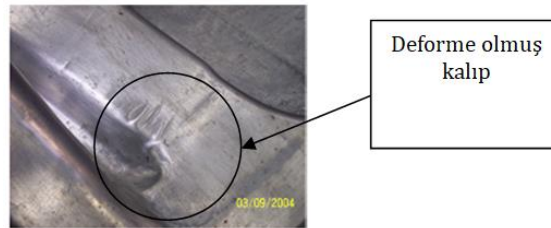
Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
O. Kayabaşı, 0000-0003-0129-1113	Başvuru Tarihi / Submission Date	07.04.2019
	Revizyon Tarihi / Revision Date	16.09.2019
	Kabul Tarihi / Accepted Date	24.09.2019
	Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Sac metal biçimlendirme, otomobil parçaları imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Teknolojik gelişmelerin artması, oldukça karmaşık parçaların üretimine olanak sağlamıştır. Sac şekillendirme işlemi, metal levhaları, alüminyum kutulardan otomobil karoseri panellerine kadar birçok çeşitli bitmiş parçaları farklı şekillere dönüştürmek için kullanılan çeşitli işlem süreçlerini belirtmektedir. Deformasyon mekaniğinin araştırılması ve anlaşılması için sac metal kalıp modelleme işlemi son zamanlarda önemli bir işlem haline gelmiştir. Konvansiyonel süreç tasarımı büyük ölçüde bir deneme yanılma prosedürü ile mevcut deneyime dayanmaktadır. Bu süreçte gerek zaman kaybı gerekse üretim maliyetlerini azaltmak için sac metal işleminin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Son yıllarda sonlu elemanlar yöntemi (SEY), özellikle simülasyon deformasyon işlemlerinde artan bir önem kazanmıştır.

Sac metal şekillendirme işleminin kalitesi, malzemenin kalıp boşluğuna akmasıyla sağlanır. Bu nedenle, kırışma ve yırtılma gibi kusurları önlemek için malzeme akış hızını kontrol etmek önemlidir. Ayrıca, otomobil karoseri imalatında, esneklik nedeniyle dış panellerin yeterli gerilmeye maruz kalması önemlidir. Genel olarak, malzeme akışı pot çemberleri tarafından kontrol edilir. Sac metal ve kalıp arasında sürtünme ile bir sınırlama kuvveti oluşturulur. Bu çalışmada, geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azalmasını en aza indirmek için çift pot çemberi kullanılmıştır.

Sac metal prosesinde buruşma giderek artan en yaygın sorunlardan biri haline gelmiştir. Bazı kabul edilemez deformasyon biçimleri derin çekme parçaları için sac metal şekillendirmede kilit yüzey sorunlarından biridir. Bunun yanında diğer sorunlardan biride üniform kalınlık, gerilme distorsiyonu ve geri yaylanma olarak sıranabilir. Araştırmacılar normalde ilk boş kontur, sürtünme koşulu, çekme direnci ve boş tutucu gibi işlem parametrelerinin birini veya birkaçını düzenlemeye çalışmaktadırlar. Şekillendirme işlemleri sırasında sac metalin kırışması kalıpta deformasyona neden olabilir. Aşırı derecede ki bu deformasyon sac metal kalıbına zarar verebilir veya tahrip edebilir. Sac metal şekillendirme işlemi esnasında buruşma neticesinde zarar görmüş bir kalıp örneği Şekil 1'de gösterilmektedir. Otomotiv panellerinin şekillendirilmesi için kullanılan kalıplar yüksek maliyetli ve karmaşık imalat işlemlerine sahip olduğundan, sac metal şekillendirme işlemlerinde buruşmanın tahmin edilmesi ve önlenmesi son derece önemlidir.



Şekil 1. Buruşma neticesi deforme olmuş kalıp (Damaged die by wrinkling.)

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Literatürde araştırmacılar, yaylanma ve buruşma problemini azaltmak için etkili yöntemleri araştırmışlardır. Şekillendirme işlemlerinde, işlem parametrelerinin şekillendirme performansı üzerindeki etkisi çoğu zaman ilgi çekicidir. Şekillendirme işlemleri sırasında buruşma ve yaylanma etkilerini araştırmak için çeşitli analitik yöntemler geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Choi T.H. ve Huh H., 1997), (Gasper G. vd., 2002), (Xiaoxiang S. vd., 2004), (Jansson T. Vd., 2005), (Hillmann M., 1999), (Ghouati O. vd., 1999), (Ohata T. vd., 1999). Buruşmanın başlaması analitik ve sayısal olarak araştırılmıştır (Cao J. ve Boyce M., 1997), (Cao J. vd., 1997), (Cao J. ve Wang X., 1999), (Wang X. ve Cao J., 1998).

Bu yöntemlerin çoğu, şekillenebilirlik özelliklerini doğru bir şekilde tahmin etmede sınırlamaları vardır. Son yıllarda, sayısal yöntemler, özellikle Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), bilgisayar ortamında biçimlendirme işlemlerini simüle etmede büyük popülerlik kazanmıştır. Günümüzde SEY, şekillendirme endüstrisindeki potansiyel şekillendirme hatalarını analiz etmede standart bir araç haline gelmiştir (Choi T.H. ve Huh H., 1997), (Gasper G. vd., 2002), (Xiaoxiang S. vd., 2004), (Jansson T. Vd., 2005).

Sac metal şekillendirme işleminde bir diğer sorun ise geri yaylanmadır. Geri yaylanmanın en aza indirilmesi, kalıp tasarımında ana hedeflerden biridir, çünkü bu tür kusurlar sonraki montajı etkiler. Geri yaylanma hem maddi özellik hem de kalıp konfigürasyonunun bir fonksiyonudur. Uygulamada geri yaylanmayı telafi etmek için bazı yöntemler vardır. Geri yaylanmanın tahmini için akma gerilmesi ve gerilme-sertleşme üssü ve takım geometrisi gibi malzeme özelliklerine dayanarak bazı araştırmacılar matematiksel model geliştirmişlerdir (Radha Krishna Lal vd., 2018), (Wang C. vd., 1993), (Prasad Y. ve Somasundaram S., 1993). Sonlu elemanlar yöntemi kusursuz modeller ile çalışmaktadır ancak imalat sürecinde hiçbir şey mükemmel değildir. Üretim süreçlerinde öngörülemeyen tasarım parametreleri ortaya çıkar. Bu öngörülemeyen parametrelerin neden olduğu riskleri önlemek için, tasarımcılar güvenlik faktörlerini kullanır. Güvenlik faktörü yerine son yıllarda bazı tasarımcılar da olasılık tabanlı tasarım tekniklerini kullanmaya başlamıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, sac metal parçanın şekillenebilirliğini geliştirmektir. Bu amaçla bir otomobil panelinin şekillendirilmesi sırasında olası hataları önlemek için etkili bir yaklaşımın geliştirilmesi ve kullanılması için üç yaklaşım önerilmiştir. İlk yaklaşımda, yaylanma, buruşma ve kalınlık azaltma etkilerinin azaltılmasında çift pot çemberi kullanımı araştırılmıştır. Pot çemberinin kalıp tasarımında kullanılmasının amacı, sac metalin kalıp içerisinde şekillenmeye başladığı anda buruşmasını önlemektir. Pot çemberi sayesinde belli bir kuvvetle sac metale baskı uygulanarak buruşma önlenir. Baskı kuvvetinin artırılması sac metalde yırtılmalara, baskı kuvvetinin azaltılması da buruşmanın artmasına sebebiyet vereceğinden buruşmayı en aza indirmek için ikinci bir pot çemberi devreye sokularak buruşmanın ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. İkinci yaklaşımda, otomobil panelinin şekillendirilebilirliğinin daha da iyileştirilmesinde optimizasyon yönteminin kullanımı araştırılmıştır. Optimizasyon yöntemiyle, optimum şekillendirme özellikleri için, şekillendirme işlemi parametrelerinin uygun değerleri (üst kalıbın ve çekme kalıbının konumları, çekme kalıbı yarıçapı, üst kalıp yüzeyine uygulanan kuvvetler ve çift pot çemberi yüzeyleri) hesaplanmıştır. Optimum değerleri bulmada, sonlu elemanlar simülasyonu, tepki yüzeyi metodolojisi ve genetik algoritma birleştirilmiştir. Verimli ve etkili bir bağlantı sağlamak için bir bilgisayar programı yazılmıştır. Üçüncü yaklaşımda olasılık tabanlı tasarım yöntemi Monte Carlo Simülasyonu, otomatik bir tasarım aracı oluşturmak için entegre edilmiştir. Sonuçların güvenilirliği, olasılık tabanlı tasarım teknikleri kullanılarak kontrol edilmiş ve iyileştirilmiştir. Yukarıda belirtilen yaklaşımların detayları aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

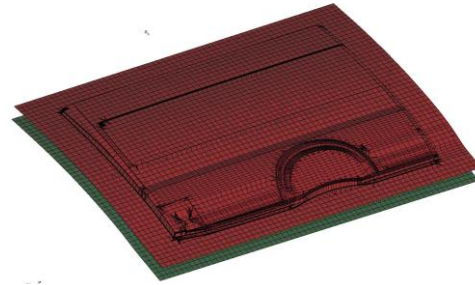
### 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

#### 3.1. Sonlu Elemanlar Modeli (Finite Element Model)

Bu çalışmada, bir otomobil yan panelinin şekillendirilme işlemi esnasında geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azalmasını araştırmak için SEY kullanılmıştır. Çalışmamızda kullanılan araç paneli ticari olarak satılan bir araca ait olup Şekil 2a'da gösterilmektedir. Araç yan paneli 3300x2400x1mm boyutlara sahip ve alüminyum malzemeden üretilmiştir (AA5182-H0). Panelin 3 boyutlu koordinat ölçme tezgahındaki ölçüm şekli Şekil 2 a'da, panelin sonlu elemanlar modeli Şekil 2b'de gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2. a) Otomobil paneli b) Sonlu elemanlar modeli ((a) Automobile side panel (b) Finite element model)

Bu çalışmada otomobil panelinin şekillendirme işlemi, LS DYNA'da geliştirilen SEY kodu kullanılarak simüle edilmiştir (Stander N. vd., 2004). Şekillendirme simülasyonu, RAM 64 Gbyte bilgi işlem platformu ile Linux küme süper bilgisayar IBM x serisinde gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli, 3 parametrelilik Barlat malzeme modeli boyunca yedi entegrasyon noktasına sahip Belytschko-Tsay kabuk elemanı kullanılarak oluşturulmuştur. 3 parametrelilik Barlat malzeme modeli 1989 yılında düzlem gerilme koşullarında modelleme için Barlat ve Lian tarafından geliştirilmiştir, Barlat modelinin matematiksel ayrıntıları referansta bulunabilir (Hallquist J. O., 2003). 3 parametrelilik Barlat malzeme modelinin mekanik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

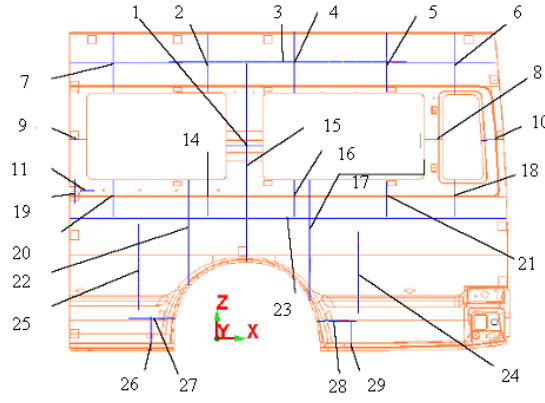
**Tablo 1.** Barlat malzeme modeli (Barlat materials model)

PARAMETRE	NOTASYON	DEĞER
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$	2,7
Young modülü (GPa)	E	69
Poisson oranı	$\nu$	0,33
Gerinim sertleşme üsteli	n	0,27
Mukavemet katsayısı (MPa)	k	558
Barlat üsteli	m	6
Lankford parametresi	R <sub>0</sub>	0,85
Lankford parameteresi	R <sub>45</sub>	0,77
Lankford parameteresi	R <sub>90</sub>	0,90

Sonlu elemanlar analiz (SEA) sonuçları, otomobil panelinde Şekil 3'te gösterilen birçok nokta için geri besleme deneysel ölçümlerine karşı doğrulanmıştır. Deneysel ölçümler Şekil 2a'da gösterildiği gibi 3 boyutlu koordinat ölçme tezgahı ile FORD Firmasının ölçüm standartları baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Farklı yönlerde geri yaylanma için deney ve SEA'nin karşılaştırılması (X ve Z yönleri) Tablo 2'de gösterilmektedir. Bu çalışmada ölçüm noktaları Şekil 3'te gösterildiği gibi FORD Firması kalite kontrol föyüne göre 29 noktadan seçilmiştir.

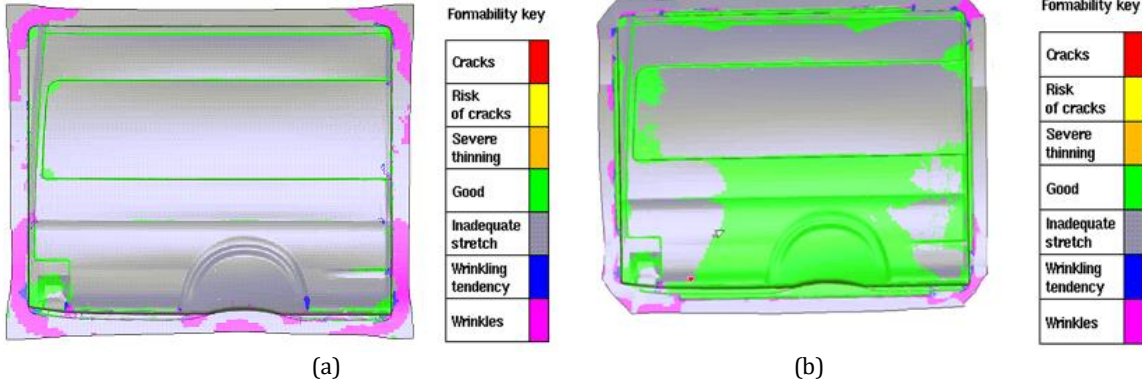
**Tablo 2.** X ve Z yönlerindeki geri yaylanma ölçümleri (Measurement springback X and Z direction)

ÖLÇÜM NOKTASI	GERİ YAYLANMA (mm)			
	DENEYSEL		SEA	
	X	Z	X	Z
1	0,658	0,850	0,726	1,003
2	0,518	0,769	0,674	0,939
3	0,523	0,770	0,672	0,938
4	0,519	0,768	0,673	0,942
5	0,515	0,772	0,679	0,945
6	0,513	0,773	0,675	0,943
7	0,518	0,769	0,674	0,945
8	0,658	0,848	0,726	1,009
9	0,650	0,844	0,718	1,010
10	0,655	0,839	0,719	1,015
11	0,645	0,823	0,726	0,995
12	0,639	0,841	0,718	1,020
13	0,645	0,852	0,719	1,022
14	0,650	0,836	0,732	1,010
15	0,646	0,837	0,733	1,013
16	0,675	0,839	0,739	1,003
17	0,656	0,835	0,740	1,006
18	0,659	0,832	0,726	1,001
19	0,640	0,851	0,726	0,995
20	0,645	0,862	0,727	0,998
21	0,642	0,846	0,730	1,012
22	0,629	0,842	0,714	1,015
23	0,656	0,850	0,713	1,019
24	0,651	0,829	0,712	1,011
25	0,659	0,838	0,710	1,015
26	0,618	0,889	0,734	1,056
27	0,617	0,889	0,736	1,061
28	0,616	0,888	0,740	1,062
29	0,619	0,887	0,745	1,049

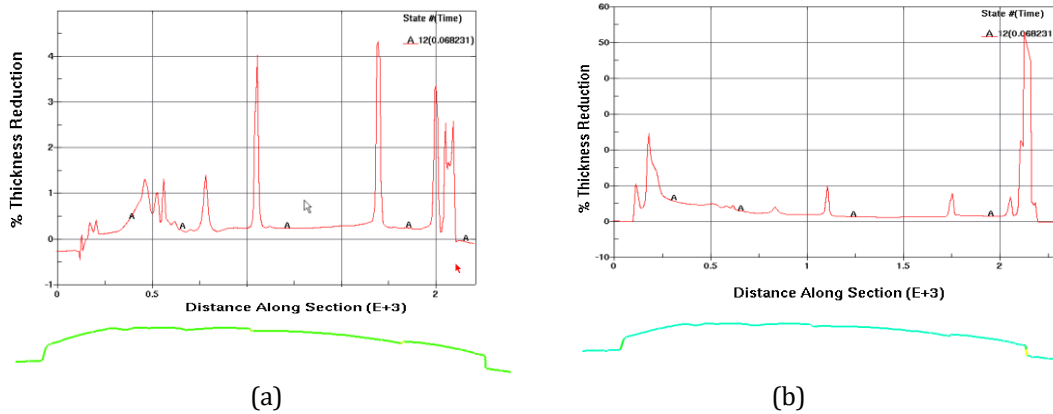


Şekil 3. Geri yaylanma ölçüm noktaları (Measurement springback point)

Tablo 2'den, sonlu elemanlar modelinin sonuçlarının deneysel ölçümlerle oldukça iyi korele olduğu görülmektedir. Bu nedenle, şekillendirme işlemlerinde parametrik çalışmalar için kullanılabilir. Sonlu elemanlar analizi (SEA) simülasyonları kullanılarak, geri yaylanma sonuçlarında çift pot çemberi kullanımının etkisi araştırılmıştır. SEA sonuçları, çift pot çemberinin kullanmanın ince panelin geri yaylanmasını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Tek pot çemberi kullanarak (geleneksel şekilde) ve çift pot çemberi kullanarak (önerilen şekilde) performans oluşturma Şekil 4-5'te gösterilmektedir. Şekil 4a ve 5a, tek pot çemberi kullanma durumunu gösterirken, Şekil 4b ve 5b, çift pot çemberi kullanma durumunu göstermektedir. Şekil 4b ve 5b, çift pot çemberi kullanmanın şekillendirme kusurlarını, buruşma ve kalınlık azaltma gibi sorunları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Buruşmaya maruz kalan alanlar da önemli ölçüde azalmıştır. Kalınlık azaltma % 50'den % 4'e düşmüştür. Bu nedenle, aşağıdaki bölümlerde panelin şekillendirilebilirliğinde daha fazla iyileştirme için temel bağlayıcı model olarak çift pot çember kullanımlı sonlu elemanlar modeli benimsenmiştir.



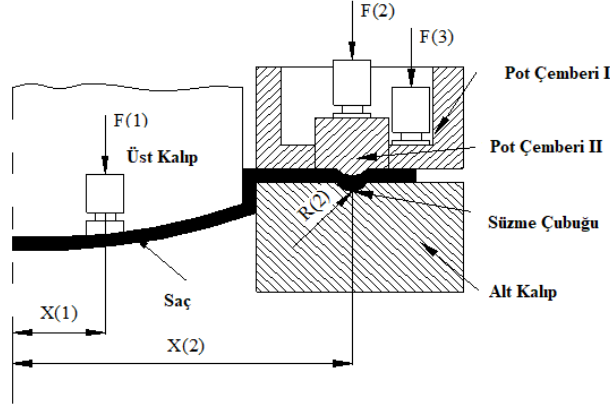
Şekil 4. Panelin şekillenebilirliği a) tek pot çemberi b) çift pot çemberi (Formability of the side panel: a) using one binder and b) using double binder.)



Şekil 5. Kalınlık azalması dağılımı a) tek pot çemberi b) çift pot çemberi (Distribution of thickness reduction on the cross section of the side panel: a) using one binder and b) using double binder.)

### 3.2. Süreç Parametrelerinin Ayarlanması İçin Optimizasyon Metodolojisi (Optimization Methodology For Adjusting Process Parameters)

panellerinin şekillendirilmesinde yaylanma, kalınlık azaltması ve buruşma asgari olması istenir. Literatürde süzme çubuğu geometrisi, süzme çubuğu konumu ve baskı kuvvetinin çoğunlukla geri yaylanma, kalınlık azaltması ve otomobil panellerinin buruşma sonuçlarını etkilediği düşünülmektedir. Geri yaylanmayı etkileyen önemli parametrelere, kalınlık azalmasına ve buruşmaya karar verildikten sonra, bir sonraki işlem bu parametreleri dikkatlice istenen sonuçlara götürecek şekilde ayarlamaktır. Bu çalışmada üst kalıbın ve süzme çubuğunun pozisyonu, süzme çubuğu yarıçapı üst kalıp yüzeyine uygulanan kuvvetler ve çift pot çemberi yüzleri etkin işlem parametreleri olarak kabul edilmiştir. Bu parametreler Şekil 6'da gösterilmektedir. Şekil 6'da, X(1) üst kalıbın (yani pistonun) panelin merkezinden uzaklığıdır, X(2) süzme çubuğunun panelin merkezinden uzaklığı, R(2) süzme çubuğunun yarıçapı, F(1) üst kalıba uygulanan kuvvet, F(2) pot çemberi II baskı kuvveti, F(3) pot çemberi I'e uygulanan baskı kuvvetidir.



Şekil 6. Şekillendirme işlemi parametreleri (Process parameters of formability)

Proses parametrelerinin deneme ve yanılma ile belirlenmesi (ayarlanması) birçok hesaplama açısından maliyetlidir. Bu amaçla daha etkili bir yaklaşım ve uygun bir optimizasyon metodolojisinin benimsenmesi amaçlanmaktadır. Optimizasyon metodolojisinde, istenen şekillendirme kriteri, işlem parametreleri olarak amaç (lar) ve sınırlama fonksiyonu (fonksiyonları) olarak ifade edilir. Bu fonksiyonlar daha sonra sayısal bir optimizasyon metodu ile optimum parametre değerlerini bulmak için çözülür.

Panel oluşumu durumunda, optimizasyon problemi aşağıdaki gibi tanımlanır:

*İşlem parametrelerini bul:*

$$X(1), X(2), R(2), F(1), F(2), F(3) \quad (1)$$

*Amaç fonksiyonunu minimize et:*

$$\text{Geri yaylanma/Buruşma/Kalınlık azalması} \quad (2)$$

*Sınır şartları:*

$$\text{Geri yaylanma} \leq \text{Geri yaylanma\_limiti} \quad (3)$$

$$\text{Buruşma} \leq \text{Buruşma\_limiti} \quad (4)$$

$$\text{Kalınlık azalması} \leq \text{Kalınlık azalması\_limiti} \quad (5)$$

*Parametre aralıkları*

$$1300 \text{ mm} \leq X(1) \leq 1500 \text{ mm} \quad (6)$$

$$1675 \text{ mm} \leq X(2) \leq 1695 \text{ mm} \quad (7)$$

$$8 \text{ mm} \leq R(2) \leq 15 \text{ mm} \quad (8)$$

$$600 \text{ ton} \leq F(1) \leq 900 \text{ ton} \quad (9)$$

$$200 \text{ ton} \leq F(2) \leq 400 \text{ ton} \quad (10)$$

$$250 \text{ ton} \leq F(3) \leq 450 \text{ ton} \quad (11)$$

Otomotiv endüstrisinde önerilen değerlere dayanarak X(1), X(2), R(2), F(1), F(2) ve F(3) aralıkları seçilmiştir (Personal Communication, *FORD OTOSAN TURKEY*, 2005). Geri yaylanma\_limiti, buruşma\_limiti ve kalınlık azalması\_limiti, optimizasyondan sonra sırasıyla geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azaltma değerlerinde karşılanacak üst sınır değerlerini temsil eder. Bir sonraki bölümde Tablo 3'te verilen değerlerin ortalaması olarak alınmıştır. Amaç ve kısıtlama fonksiyonları, optimizasyon işleminin başlamasından önce açıkça bilinmemektedir. Tablo 3'teki verileri kullanarak Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (YYM) kullanılarak SEA sonuçlarından elde edilmiştir. YYM, aşağıdaki bölümde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Optimizasyon problemini etkili bir şekilde çözmek için Genetik Algoritma (GA) programı geliştirilmiştir. Global bir optimum bulmak için geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azaltma gibi YYM bazlı analitik modeller ile entegre edilmiştir.

GA uygulamasında, popülasyon büyüklüğü 50, çaprazlama oranı 1.0, mutasyon oranı 0.1, her bir değişken için bit sayısı 16 ve kuşak sayısı 500 olarak kullanılmıştır. Bu parametreler birkaç denemeden sonra en iyi performans için optimize edilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen GA, objektif değere ve kısıtlama ihlali seviyesine dayalı kromozomları seçmektedir. Kromozomların uygunluk değerleri asgari objektif değere ve geçit evresindeki en az olanaksız kümelerle doğru eğilim gösterecektir. Literatürdeki GA'ların çoğu, kısıtlı optimizasyon problemini, çözümden önce ceza fonksiyonlarıyla kısıtlanmamış bir optimizasyon problemine dönüştürmüştür. Bu, kullanıcı deneyimi gerektiren, soruna bağlı ceza katsayılarının uygun bir şekilde seçilmesinin zorluğunu getirmektedir. Bu çalışmada geliştirilen programda, herhangi bir probleme bağımlı katsayısına ihtiyaç duyulmadığından bu zorluk tamamen önlenmiştir.

### 3.3. Geri Yaylanma, Buruşma ve Kalınlık Azalması için Yanıt Yüzey Modeli (YYM) (Response Surface Model (RSM) for Springback, Wrinkling and Thickness Reduction)

Optimizasyon probleminin çözümü Denklemler 1-11'de verilmiştir, hesaplamalı olarak yüksek maliyetli SEA'lardan gelen amaç ve kısıtlama fonksiyonları birçok kez değerlendirilmiştir. Bu, çözüm sürecini verimsiz hale getirebilir. Daha etkili bir çözüm stratejisi, çözüm sürecinden önce YYM kullanarak amaç ve kısıtlama işlevlerini karşılık gelen daha basit analitik işlevlerle değiştirmektir. YYM, denemenin istatistiksel tasarımına ve en küçük kare hata uydurmalarına dayanan bir model oluşturma tekniği olarak tanımlanır (Myers R. H. ve Montgomery D. C., 1995). YYM, aşağıdaki gibi mevcut veriler için bir polinom işlevi yaratır:

$$f = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \dots \quad (12)$$

$A_0$ ,  $a_i$  ve  $a_{ij}$  ayarlama katsayıları ve  $n$  parametre sayısıdır (yani proses parametreleri). YYM tarafından üretilen polinom modelleri genellikle literatürde Yanıt Yüzeyi (YY) modelleri olarak ele anılır. YY modelleri oluşturmak için bu çalışmada bir bilgisayar programı yazılmıştır. Yeterli veri varsa, programın 10. dereceye kadar YY polinomları oluşturma yeteneği vardır. Modellerdeki tüm çapraz terimler dikkate alınabilir. YY modelleri ayrıca parametrelerin tersi yönünden de üretilebilir. Şayet istenirse, YY modelinde (yani ters) olarak değiştirilebilir. YY modellerinin oluşturulmasında, D-optimal deneysel tasarım yöntemine dayanan SEA sonuçları kullanılmıştır. İstatistiksel olarak üç seviyeli tam faktör deneysel tasarım D-optimalite için temel olarak kullanılmıştır. Kuadratik bir yanıt yüzey modeli oluşturmak için  $(n + 1) / (n + 2) / 2$  şeklindedir. Sonuçta  $n$ , tasarım parametrelerinin sayısıdır. Literatürde modelin tahmin doğruluğunun iyileştirilmesi için gerekenden % 50 daha fazla nokta önerilmektedir. 6 tasarım parametresi için, bu çalışmada Tablo 3'te gösterilen 40 SEA gerçekleştirilmiştir. Tablo 3'te işlem parametrelerinin oluşturulması, D-optimal deneysel tasarım yöntemi kullanılarak seçilmiştir. Geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azalması için optimizasyon işleminin hesaplama maliyetini düşürmek için YYM kullanılarak en önemli proses parametreleri (X (1) mm, X (2) mm, R (2) mm F (1) ton F (2) ton F(3) ton) cinsinden üretilmiştir. Bu çalışmadaki optimizasyon metodolojisi diğer sac metal parçaları geliştirmek için de kullanılabilirliği göstermektedir.

**Tablo 3.** Parametrelerin kombinasyonu (Combination of parameters)

ANALİZ	X(1) (mm)	X(2) (mm)	R(2) (mm)	F(1) (ton)	F(2) (ton)	F(3) (ton)	GERİ YAYLANMA (mm)	BURUŞMA (mm)	KALINLIK AZALMASI (%)
1	1300	1675	8	900	200	250	0.528	2.28	5
2	1300	1675	8	600	400	250	0.643	2.43	5
3	1500	1675	15	600	400	450	0.617	2.36	4
4	1300	1695	15	600	400	350	0.619	2.37	4
5	1500	1695	8	900	400	450	0.516	2.21	6
6	1300	1695	8	600	200	250	0.652	2.52	6
7	1500	1675	12	900	200	450	0.508	2.20	3
8	1300	1695	8	600	400	450	0.610	2.35	4
9	1300	1695	8	900	200	450	0.598	2.33	4
10	1300	1675	8	900	400	450	0.568	2.29	4
11	1400	1675	8	600	200	350	0.602	2.35	4
12	1400	1675	15	750	200	450	0.548	2.29	3
13	1500	1695	8	900	200	250	0.413	2.15	4
14	1300	1695	15	900	400	450	0.315	2.10	3
15	1500	1685	15	900	300	350	0.317	2.11	3
16	1300	1695	15	900	200	250	0.420	2.17	2
17	1500	1695	8	600	300	350	0.499	2.25	5
18	1500	1695	15	600	200	450	0.481	2.23	3
19	1500	1685	8	600	400	250	0.492	2.24	4
20	1500	1675	15	600	200	250	0.473	2.20	3
21	1500	1675	8	900	300	250	0.412	2.19	5
22	1300	1675	12	600	200	450	0.419	2.21	4
23	1400	1685	12	600	300	250	0.400	2.18	4
24	1400	1675	15	900	400	250	0.390	2.16	3
25	1500	1675	12	750	400	350	0.398	2.17	4
26	1500	1695	15	750	400	250	0.383	2.14	2
27	1500	1685	8	750	200	450	0.403	2.18	4
28	1300	1695	8	900	400	250	0.406	2.15	5



**Tablo 3.** Devamı (Continued)

ANALİZ	X(1) (mm)	X(2) (mm)	R(2) (mm)	F(1) (ton)	F(2) (ton)	F(3) (ton)	GERİ YAYLANMA (mm)	BURUŞMA (mm)	KALINLIK AZALMASI (%)
29	1350	1695	13	900	400	450	0.383	2.09	3
30	1400	1695	13	900	400	450	0.376	2.05	3
31	1450	1695	13	900	400	450	0.375	2.05	3
32	1500	1695	13	900	400	450	0.371	2.05	3
33	1300	1675	15	900	400	450	0.378	2.05	2
34	1350	1675	15	900	400	450	0.377	2.04	2
35	1400	1675	15	900	400	450	0.375	2.05	2
36	1400	1695	10	900	400	450	0.392	2.06	2
37	1450	1695	10	900	400	450	0.390	2.02	4
38	1500	1695	10	900	400	450	0.387	2.08	4
39	1300	1675	11	900	400	450	0.381	2.06	4
40	1350	1675	11	900	400	450	0.380	2.05	5

### 3.4. İşlem Parametreleri Oluşturma İçin Optimizasyon Sonuçları (Optimization Results for Generating Process Parameters)

1-11 Denklemlerle temsil edilen optimizasyon problemi birkaç durum için çözülmüştür. Her durumda, belirtilen şekillendirme kriterlerini en aza indirmek için en uygun işlem parametreleri aranmıştır. Bu aşamada GA optimizasyon seçilerek X(1), X(2), R(2), F(1), F(2) ve F(3) değerleri belirlenerek geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azalması değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada 4 durum için değerlendirme çalışması yapılmıştır.

Örneğin, 1. durumda, otomobil paneli için geri yaylanma asgariye indirmiştir. 2. Durumda buruşma minimize edilmiştir. 3. durumda, kalınlık azalması en aza indirilmiştir. 4. durumda, yaylanma, buruşma ve kalınlık azalması aynı anda en aza indirilmiştir. Her durumda, kısıtlama fonksiyonları 6-11 Denklemlerinde verilenlerle aynıdır.

Durum I'de optimizasyon hedefi, otomobil panelindeki geri yaylanmayı en aza indirmektir. Bu amaca ulaşmak için bulunan optimum biçimlendirme parametresi değerleri Tablo 4'te gösterilmektedir. Durum II'de optimizasyonun amacı, otomobil panelinde sadece buruşmayı en aza indirmektir. Bu amaca ulaşmak için bulunan optimum biçimlendirme parametresi değerleri Tablo 5'de gösterilmektedir. Durum III'de optimizasyon amacı, otomobil panelinde sadece kalınlık azalmasını en aza indirmektir. Bu amaca ulaşmak için bulunan optimum biçimlendirme parametresi değerleri Tablo 6'da gösterilmektedir. Durum IV'te, yaylanma, buruşma ve aynı zamanda kalınlık azalmasını en aza indirmek için çok amaçlı optimizasyon uygulanır. Bu amaca ulaşmak için bulunan optimum biçimlendirme parametresi değerleri Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 4-7'den itibaren, bu çalışmada kullanılan optimizasyon metodolojisinin geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azalması için istenen sonuçlara yol açtığı görülmektedir. GA'dan optimizasyon sonuçları SEA'lerinden gelenlerle de iyi koreledir. Optimizasyon sonuçları yaylanma, buruşma ve tek amaç işlevi durumunda çok amaçlı işlev durumunda kalınlığın azaltılması için daha iyidir. Tablolardan, X(2), R(2) ve F(1) 'in işlem parametrelerinin oluşturulmasının, optimizasyon kriterleri değiştiğinde fazla değişmediği de görülmektedir. F(3) çok az değişmekte bununla birlikte, X(1) ve F(2) belirtilen oluşturma kriterlerine göre değişmektedir. Okuyucu için bir hatırlatıcı olarak, optimizasyon işleminde daha sofistike YY modelleri (kübik veya dördüncü dereceden pynomial'ler gibi) inşa edilerek ve kullanarak GA tarafından optimum hale getirilebilir. Bununla birlikte, bu gelişme ekstra SEA'lerin maliyeti ile birlikte gelir.

**Tablo 4.** Geri yaylanmada şekillendirme işlem parametresi (Forming process parameter in springback)

	GERİ YAYLANMA (mm)	BURUŞMA (mm)	KALINLIK AZALMA (%)	OPTİMUM ŞEKİLLENDİRME PROSES PARAMETRELERİ					
				X(1) (mm)	X(2) (mm)	R(2) (mm)	F(1) (N)	F(2) (N)	F(3) (N)
GA	0.1062	1.9001	2.3665	1377.2	1694.1	14.8	896	340	251

**Tablo 5.** Buruşmada şekillendirme işlem parametresi (Forming process parameter in wrinkling)

	GERİ YAYLANMA (mm)	BURUŞMA (mm)	KALINLIK AZALMA (%)	OPTİMUM ŞEKİLLENDİRME PROSES PARAMETRELERİ					
				X(1) (mm)	X(2) (mm)	R(2) (mm)	F(1) (N)	F(2) (N)	F(3) (N)
GA	0.1103	1.8996	2.1272	1395.5	1693.4	15	899.7	313.2	254.7

**Tablo 6.** Kalınlık azalmanda şekillendirme işlem parametresi (Forming process parameter in thickness reduction)

	GERİ YAYLANMA (mm)	BURUŞMA (mm)	KALINLIK AZALMA (%)	OPTİMUM ŞEKİLLENDİRME PROSES PARAMETRELERİ					
				X(1) (mm)	X(2) (mm)	R(2) (mm)	F(1) (N)	F(2) (N)	F(3) (N)
GA	0.3376	2.0615	1.3817	1478.9	1694.5	15	898.4	205.7	260.6

**Tablo 7.** Üç durumda şekillendirme işlem parametresi (Forming process parameter in three cases)

	GERİ YAYLANMA (mm)	BURUŞMA (mm)	KALINLIK AZALMA (%)	OPTİMUM ŞEKİLLENDİRME PROSES PARAMETRELERİ					
				X(1) (mm)	X(2) (mm)	R(2) (mm)	F(1) (N)	F(2) (N)	F(3) (N)
GA	0.3042	2.0325	1.3317	1463.9	1694.8	14.9	894.1	209.9	250.9

### 3.5. Olasılık Tabanlı Metot ve Monte Carlo Simülasyonu (Probability Based Method and Monte Carlo Simulation)

Monte Carlo metodu, araştırılan değeri belirlemek için birçok rastgele denemenin oluşturulması esasına dayanmaktadır. Model girdilerindeki değişkenleri model çıktısına yaymak için spesifik olarak kullanımına örnektir. Simülasyon, girdileri tanımlayarak belirsizlikleri açıkça temsil etme sürecine dayanmaktadır.

Sac metal kalıp sisteminin olasılıksal tepkisi, aşağıdaki gibi modellenmiştir.

$$Z(X) = Z(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n), \quad (13)$$

$Z(X)$ , sistemin tepkisini tanımlayan rastgele bir değişkendir (örneğin, bir düğümdeki veya elemandaki yaylanma, buruşma ve kalınlık azalması),  $X_i$  ( $i = 1, n$ ), model giriş değişkenlerini tanımlayan rastgele değişkenlerdir. Bu çalışmada  $Z$  sonlu elemanlar modelinden elde edilmiştir. Olasılıklı cevap için Monte Carlo örnekleme teknikleri kullanılmıştır. Monte Carlo yöntemi, bir bilgisayarda istatistiksel örnekleme deneyleri yaparak çeşitli matematiksel sorunlara yaklaşık çözümler sunmaktadır.

Olasılık tabanlı optimizasyon işleminde, tasarım parametrelerinin olasılık dağılımları hesaplanmaktadır. Olasılık dağılım sonuçları, tasarımın güvenilirlik değişikliğini göstermektedir. Tasarımcı, müşteri isteklerine göre güvenilirlik değerlerini kullanır. Bu işlem, minimum maliyetle maksimum güvenlik ve kaliteye yol açar.

Olasılık tabanlı bir analizde, başarısızlık olasılığı, yapının olasılıksal tepkisi ile malzemenin olasılıksal mukavemeti karşılaştırılarak rastgele değişkenlerin bir işlevi olan bir performans işlevi formüle edilerek belirlenebilir (Demir, İ., vd., 2008).

Arıza riski, türün performans fonksiyonuna göre hesaplanmıştır.

$$g(X) = R(X) - S(X) \quad (14)$$

$R(X)$ , bileşenin direncini açıklayan rastgele bir işlev olduğunda,  $S(X)$  yapının tepkisidir (ör. Yaylanma, buruşma ve kalınlık azaltma), ayrıca rastgele bir değişkendir ve  $X$ , rastgele değişkenlerin vektörü;  $g(X)$  bir başarısızlık olayını temsil eder. Başarısızlık olasılığı Denklem 15'teki gibi tanımlanmıştır.

$$pf = P(g(X) < 0) \quad (15)$$

Sac levha kalıbı için performans fonksiyonları formüle edilip üç performans işlevi incelenmiştir.

$$g_1 = R_{\text{Geri yaylanma limiti}} - S_{\text{Hesaplanan geri yaylanma}} \quad (16)$$

$$g_2 = R_{\text{Kalınlık azalma limiti}} - S_{\text{Hesaplanan kalınlık azalması}} \quad (17)$$

$$g_3 = R_{\text{Buruşma limiti}} - S_{\text{Hesaplanan buruşma}} \quad (18)$$

$S(X)$ , üç boyutlu sonlu elemanlar modelinden belirlenen hesaplanmış yanıt ölçüsüdür. Olasılıklı tepki ve başarısızlık olasılığı hem ilk hem de deterministik olarak optimize edilmiş kalıp tasarımı için ölçülmüştür. Rastgele değişken istatistikleri, yazılı programdaki rastgele değişken tanımı penceresinde tanımlanır. Model giriş değişkenlerinin rastgele değişken tanımları literatürden ve gerçek deneysel test verilerinden belirlenmiştir. 3



parametrelili Barlat malzeme modelinin mekanik özellikleri Tablo 8'de gösterilmektedir. Panelin geri yaylanması, LS-DYNA özelliği kullanılarak simüle edilmiştir. Model giriş değişkenlerinin rastgele değişken tanımları, gerçek deneysel test verilerinden belirlenmiştir. Elde edilen veriler Tablo 9'da gösterilmektedir.

**Tablo 8.** Barlat malzeme modeli (Barlat material properties)

PARAMETRE	NOTASYON	ORTALAMA	S.D	DEĞİŞİM KATSAYISI (%)	DAĞILIM TİPİ
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$	2.7	0.31	11.3	Lognormal
Young Modülü (GPa)	E	69	6.90	10	Lognormal
Poisson Oranı	$\nu$	0.33	0.028	8.2	Lognormal
Gerinim-Sertleşme Üsteli	n	0.27	0.033	12	Lognormal
Dayanım Katsayısı (MPa)	k	558	60.265	10.8	Lognormal
Barlat Üsteli	m	6	0.642	10.7	Lognormal
Lankford parameter in 0°	R <sub>0</sub>	0.85	0.076	9	Normal
Lankford parameter in 45°	R <sub>45</sub>	0.77	0.077	10	Normal
Lankford parameter in 90°	R <sub>90</sub>	0.90	0.086	9.6	Lognormal

**Tablo 9.** SEM için rasgele değişken (Random variable for FEM)

DEĞİŞKEN	ORTALAMA	S.D	DEĞİŞİM KATSAYISI (%)	DAĞILIM TİPİ
F(1) (ton)	750	119.25	15.9	Lognormal
F(2) (ton)	300	133.80	44.6	Lognormal
F(3) (ton)	350	87.50	25.0	Lognormal
X(1) (mm)	1400	350	25.0	Lognormal
X(2) (mm)	1685	421.25	25.0	Lognormal
R(1) (mm)	11.50	2.875	25.0	Lognormal

#### 4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmada, geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azalması ihtimallerini değerlendirmek için tasarım optimizasyonu metodolojisi uygulanmıştır. Olasılık tabanlı analizin performans işlevi Tablo 10'da sonlu başarısızlık olasılıklarını ortaya koymaktadır. Otomobil panellerinde geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azalması direk olarak kaliteyi etkilemektedir. Geri yaylanmanın fazla olması durumunda panellerin fiktürlerde kaynak edilmesinde problem oluşturacaktır. Ayrıca otomobilin dış görünüşü açısından görsel kalitede sorun teşkil edecektir. Buruşmanın fazla olması da zamanla kalıbın aşınmasına sebebiyet verecek ve kalıbın kırılmasına yol açacaktır. Kalınlığın fazla azalması da mukavemet açısından zayıflık gösterecektir. Bu sebeple çalışmamızda tüm performans fonksiyonları incelenmiştir. Sonuçlar Tablo 10'da gösterilmektedir.

**Tablo 10.** Performans fonksiyonu sonuçları (Performance function results)

HATA KRİTERİ	pr%
S <sub>Hesaplanan geri yaylanma</sub>	2.75
S <sub>Hesaplanan kalınlık azalması</sub>	3.61
S <sub>Hesaplanan buruşma</sub>	2.73

Nihai bir sac kalıp kalıbı tasarımıyla sonuçlanan deterministik optimizasyon sonuçları Tablo 11'de gösterilmektedir. Optimizasyon sonucunda X(1), X(2), R(2), F(1), F(2) ve F(3) değerleri belirlenmiştir.

**Tablo 11.** Optimum kalıp tasarımı (Optimum die design)

X(1) (mm)	X(2) (mm)	R(2) (mm)	F(1) (ton)	F(2) (ton)	F(3) (ton)
1600	1695	8	600	200	250

Sac kalıp işleminde geri dönüşün deterministik olarak minimuma indirgenmesi, buruşma ve kalınlık azalması nedeniyle oluşturulan bu son şekil, ölçülen veri sonuçlarına kıyasla bir azalmayla sonuçlanmıştır. Bu değerler sırasıyla % 10,29 geri yaylanma, % 9,34 kırışıklık ve % 5,75 kalınlık azalmasıdır. Optimizasyon, her bir yapısal cevabın hem ortalama değerinde hem de standart sapmasında bir azalmayla sonuçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 12'de gösterilmektedir.

**Tablo 12.** Karşılaştırmalı sonuçlar (Compared results)

	PANEL ÜZERİNDEN ÖLÇÜLEN DEĞER		HESAPLANAN VERİ		HATA %	
	ORTALAMA	S.D	ORTALAMA	S.D	ORTALAMA	S.D
GERİ YAYLANMA	0.418	11.09	0.461	12.26	10.29	10.55
BURUŞMA	2.12	10.68	2.318	11.57	9.34	8.34
KALINLIK AZALMASI %	4	6.02	4.23	6.94	5.75	15.29

İncelenen tüm performans fonksiyonları için deterministik optimizasyon, Tablo 13'deki başarısızlık ihtimalinde bir düşüşe yol açmıştır. Bu sonuç oldukça önemlidir. Yaylanma, buruşma, kalınlık azalması, sac metal kalıp

tasarımında çok önemli bir faktördür. %13.45 geri yaylanmada, % 12.19 kalınlık azalması ve % 9.53 buruşmada hata oranı ile performans fonksiyonu analizinde panel üzerinden ölçülen deneysel sonuca göre yaklaşım göstermiştir. Optimizasyon sürecine entegre edilen olasılık tabanlı optimizasyon metodolojisi oldukça yakın bir sonuç vermiştir. Bu metodolojinin kullanılması kalıp tasarımında zamandan ve kalıp maliyetinden kazanç sağlayacaktır. Bu çalışmada ayrıca tasarım parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Bu tasarım parametrelerinin optimizasyon geçmişinde sac metal kalıp üzerinde ne kadar etkili olduğu hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan yola çıkılarak tasarımcı sac metal kalıbı tasarlariken hangi parametrenin geri yaylanma, buruşma ve kalınlık azalmasına daha etki ettiğine dikkat ederek optimum kalıp tasarımı yapabilecektir. Sonuçlar Tablo 14'te gösterilmektedir.

**Tablo 13.** Performans fonksiyonu sonuçları (Performance function results)

PERFORMANS FONKSİYONU	HATA KRİTERİ	PANEL ÜZERİNDEN ÖLÇÜLEN VERİ P <sub>F</sub> (%)	HESAPLANAN VERİ P <sub>F</sub> (%)	HATA (%)
1	ŞHesaplanan geri yaylanma	3.12	2.75	13.45
2	ŞHesaplanan kalınlık azalması	4.05	3.61	12.19
3	ŞHesaplanan buruşma	2.99	2.73	9.53

**Tablo 14.** Tasarım parametrelerinin etkisi (Effects of design parameters)

TASARIM PARAMETRELERİ	GERİ YAYLANMA (%)	BURUŞMA (%)	KALINLIK AZALMA (%)
X(1)	46	57	41
X(2)	79	63	64
R(2)	58	62	51
F(1)	51	12	58
F(2)	67	78	68
F(3)	68	72	69

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

Bu çalışmada, bir otomobil yan panelinin şekillendirilebilirliğinin geliştirilmesi üç yaklaşım kullanılarak incelenmiştir. İlk yaklaşımda, çift pot çemberinin kullanılmasının yaylanma, kırışıklık ve kalınlık azaltma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Uygun bir damgalama kuvvetine sahip çift pot çemberinin biçimlendirilebilirliğini önemli ölçüde artırdığı gözlenmiştir. İkinci yaklaşımda, otomobil panelinin şekillendirilebilirliğinin daha da iyileştirilmesinde optimizasyon yönteminin kullanımı incelenmiştir. Üçüncü yaklaşımda, bir otomobil yan panelinin, kalıp sisteminin arızalanması olasılığına ilişkin öngörülebilirliğini geliştirmek için mevcut işe olasılık tabanlı yaklaşım uygulanmıştır. Klasik tasarımda değişkenler sabit olarak belirlenir. Halbuki gerçeğinde değişkenler sabit olmayıp değerlerinin ortalaması ve standart sapması mevcuttur. Bu belirsizlikleri ortadan kaldırmak için Monte Carlo Simülasyonu kullanılmıştır. Bu uygulamada değişkenler için rastgele değerler atanarak sistemin olasılığı belirlenmiştir. Belirsizlik ve değişkenlik, kalıp sisteminin olasılık tabanlı sonlu elemanlar analizinde hesaba katılmıştır. Rastgele değişkenler, baskı kuvvetini, sac malzeme özelliklerini tanımlamak için kullanılmıştır. Arıza riski, arıza modları açısından açıkça belirlenmiştir: geri yaylanma, kırışıklık ve kalınlık azaltma arızası. Optimizasyon yöntemi ile en iyi şekillendirme parametreleri incelenmiştir. Üst kalıbın pozisyonu ve çekme kalıbı, çekme kalıbı yarıçapı, üst kalıp yüzeyine uygulanan kuvvetler ve çift pot çemberi yüzeyleri proses parametreleri olarak kabul edilmiştir. Optimum değerleri bulmada SEA, YYM ve GA'nın gücü kullanılmış ve optimizasyon sürecine entegre edilmiştir. SEA'lar, D-optimal deneysel tasarım yöntemi kullanılarak tasarlanmış proses parametrelerinin kombinasyonu için gerçekleştirilmiştir. Geri yaylanma, kırışıklık ve kalınlık azaltma için tahmin edici modeller, YYM'den yararlanan SEA sonuçları kullanılarak oluşturulmuştur. YY modelleri daha sonra optimum proses parametre değerlerini bulmak için etkili bir GA ile entegre edilmiştir. Genetik Algoritma ile yapılan optimizasyon işlemi sonucunda geri yaylanma, kırışıklık ve kalınlık azalması değerlerinin önemli ölçüde azaldığı ortaya çıkmıştır. Optimizasyon sonuçlarından, optimizasyon kriterleri değiştiğinde X(2), R(2) ve F(1) 'in işlem parametrelerinin değişmediği görülmüştür. F(3) çok az değişmiştir. Ancak, X(1) ve F(2) belirtilen oluşturma kriterlerine göre değişmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada önerilen optimizasyon metodolojisi, otomotiv endüstrisinde şekillendirme işlemlerinde en iyi şekillendirilebilirlik koşullarını geliştirmek ve belirlemek için başarıyla kullanılabilir.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma FORD OTOSAN TÜRKİYE Takım ve Kalıp ve Prototip İmalat Bölümü için yapılmıştır, Yazar tasarım sürecinde gerekli verileri sağlayan Ferit Fırat'a teşekkür eder.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

**Kaynaklar (References)**

- Cao, J., Boyce, M., 1997. Wrinkling behavior of rectangular plates under lateral constraint, *International Journal of Solids and Structure*, 34, 153 -176.
- Cao, J., Karallis, A., Ostrowski, M., 1997. Prediction of flange wrinkles in deep drawing, *Advanced methods in material processing defects*, 301-310.
- Cao, J., Wang, X., 1999. An analytical model for plate wrinkling under tri-axial loading and its application, *International Journal of Mechanical Sciences*, 42(3), 617-633.
- Choi, T.H., Huh, H., 1997. Draw-bead Simulation by an Elasto-plastic Finite Element Method with Directional Reduced Integration, *Journal of Material Processing Technology*, 63, 666-671.
- Gasper, G., Tomaz, P., Karl, K., 2002. Optimization of sheet metal forming process by use of numerical simulations, *Journal of Material Processing Technology*, 130-131, 54-59.
- Ghouati, O., Lenoir, H., Gelin, J.C., 1999. Optimisation techniques for the drawing of sheet metal parts, *Proceedings of the Fourth International Conference on Numerical Simulations NUMISHEET'99*, 293-298.
- Demir, İ., Kayabasi, O., Ekici, B., 2008. Probabilistic design of sheet-metal die by finite element method, *Materials and Design*, 29 (3), 721-727.
- Hallquist, J.O., 2003. *LS-DYNA Theoretical Manual*, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA.
- Hillmann, M., 1999. Optimisation of sheet metal forming processes using simulation programs, *Proceedings of the Fourth International Conference on Numerical Simulations NUMISHEET'99*, 287-292.
- Jansson, T., Andersson, A., Nilsson, L., 2005. Optimization of draw-in for an automotive sheet metal part An evaluation using surrogate models and response surface, *Journal of Material Processing Technology*, 159, 426-434
- Myers, R.H., 1995. *Montgomery DC,, Response surface methodology process and product optimization using designed experiments*, John Wiley and Sons, Inc., New York, USA.
- Ohata, T., Katayama, T., Nakamachi, E., Nakamura, Y., Kawahara, H., 1999. Improvement of optimum process design system by numerical simulation—discretized optimisation method, *Proceedings of the Fourth International Conference on Numerical Simulations NUMISHEET'99*, 293-298.
- Personal Communication, 2005. FORD OTOSAN TURKEY Tool&Die and Prototype Manufacturing Department Turkey.
- Prasad, Y., Somasundaram, S., 1993. Mathematical model for bend allowance calculation in automated sheet-metal bending, *Journal of Materials Process Technology*, 39 (3), 337-356.
- Radha, K. L., Vikas, K. C., Dwivedi, S.K., 2018. Study of factors affecting Springback in Sheet Metal Forming and Deep Drawing *Process Materials Today: Proceedings* 5, 4353-4358.
- Stander, N., Eggleston, T., Craig, K., Roux, W., 2004. *LS-OPT User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA.
- Wang, X., Cao J., 1998. An analytical model for predicting flange wrinkling in deep drawing, *Transactions of NAMRI SME*, XXVI:25, 30.
- Wang, C., Kinzel, G., Altan T., 1993. Mathematical modeling of planestrain bending of sheet and plate, *Journal of Materials Process Technology*, 39 (3), 279-304.
- Xiaoxiang, S., Jun, C., Yinghong P., Xueyu R., 2004. A new approach of die shape optimization for sheet metal forming process, *Journal of Material Processing Technology*, 152, 35-42.



## ÇEKVALF SİSTEMLİ HOUSİNG KAPAĞININ TASARIMININ GELİŞTİRİLİP PROTOTİP PARÇA ÜZERİNDE TESTLERİN YAPILMASI

Ömer Şaban KAMBER\*

İhlas Ev Aletleri İmalat Sanayi ve Ticaret A.S., İstanbul, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*FDM Teknoloji,  
Çekvalfli Sistem,  
Prototip,  
Maliyet Analizi.*

### Öz

İnsan vücudu %70 oranında sudan oluşmaktadır. Vücuda alınan su tüm organlara etki etmektedir. İçilen suyun kalitesi bu nedenle insanlar için hayati öneme sahiptir. Suyun içerisinde yararlı maddeler olduğu gibi zararlı maddelerde bulunmaktadır. Su arıtma cihazları suyun içerisindeki zararlı maddelerin ayrıştırmasını filtreler yardımıyla sağlamaktadır. Suyun filtreler arasında geçişi housing kapak parçası vasıtasıyla sağlanmaktadır. Filtreler üzerinden belirli miktar ( kullanılan filtrenin özellik ve türüne göre bu miktar değişmektedir) su geçtikten sonra değiştirilmesi gerekmektedir. Filtrelerin değişimi sırasında su arıtma cihazı içerisindeki basınçtan dolayı housing kapaktan su dışarı çıkmaktadır. Filtre değişimi esnasında ortama gelen su montaj mahalindeki mobilyalara, halılara ve parke marleyle zarara verebilmektedir. Bu su kaçağını önlemek için housing kapak parçasına çekvalf sistemi eklenmesine karar verilmiştir. Bu amaçla üç farklı housing kapak tasarımı geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu parçaların prototiplerinin montajları yapılarak su sızdırmazlık testlerinin yapılması hedeflenmiştir. Prototip parçalara yapılan testlerle sistemin çalışması esnasındaki su geçiş miktarı ve maliyet analizleri yapılarak en uygun tasarımın belirlenmesi hedeflenmiştir.

## DEVELOPING DESIGN OF HOUSING COVER WITH CHECK VALVE SYSTEM AND MAKING TESTS ON ITS PROTOTYPE

### Keywords

*FDM Technology,  
Checkvalve System,  
Prototype,  
Cost Analysis.*

### Abstract

The human body consists of 70% water. Water taken into the body affects all organs. The quality of the drinking water is therefore vital to humans. There are beneficial substances in water as well as harmful substances. Water treatment devices provide the separation of harmful substances in the water with the help of filters. The passage of the water between the filters is provided by the housing cover part. A certain amount of filters (this amount varies according to the characteristics and type of the filter used) needs to be changed after the water has passed. During the change of filters, water comes out of the housing cover due to the pressure in the water treatment device. Water coming into the environment during the filter change can damage the furniture, carpets and parquet floor in the installation site. In order to prevent this water leakage, it was decided to add a check valve system to the housing cover part. For this purpose, it is aimed to develop three different housing cover designs. The prototypes of these parts were assembled and water leakage tests were aimed. It was aimed to determine the most suitable design by making the water passage amount and cost analysis during the operation of the system with the tests made on prototype parts.

### Alıntı / Cite

Kamber, Ö.Ş., (2020). Çekvalf Sistemli Housing Kapağının Tasarımının Geliştirilip Prototip Parça Üzerinde Testlerin Yapılması, Mühendislik ve Tasarım Dergisi, 8(1), 210-220.

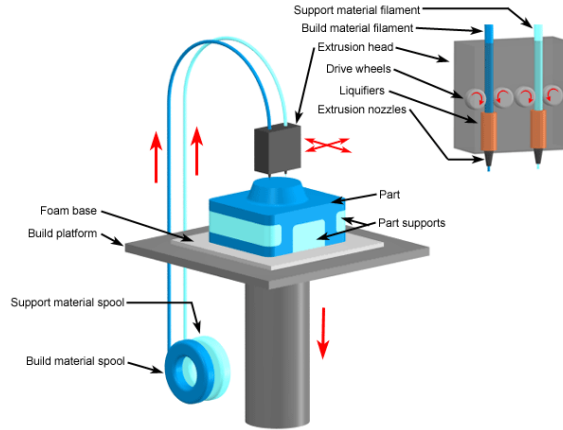
\* İlgili yazar / Corresponding author: okamber@gmail.com, +90-505-499-0130

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
Ö.Ş. Kamber, 0000-0002-0260-8533	Başvuru Tarihi / Submission Date	07.01.2019
	Revizyon Tarihi / Revision Date	23.08.2019
	Kabul Tarihi / Accepted Date	24.09.2019
	Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Eritilmiş Malzeme Yığılma/Fused Deposition Modelling (EMY/FDM) lif halindeki termoplastik malzeme eritilerek oluşturulan tabakanın üstünde yeni bir katmanın oluşturulmasına dayanan bir sistemdir (Teknology, 2016). FDM'de işlemlere üretilecek parçanın, 3D CAD datasının katı model formundayken makinenin işlem gördüğü STL formatına çevrilmesiyle başlanır. Ardından parçanın mukavemet ve esneklik gibi özelliklerini etkileyen malzeme seçimi yapılır ve üretim oryantasyonu belirlenir. 0,127-0,330 mm arasında uygun katman kalınlığı seçilerek katı model Insight yazılımı kullanılarak katmanlara ayrılır (Erten, 1997).

Sıcaklık kontrollü ekstrüzyon kafası, yarı eriyik mertebesine ulaşıncaya kadar ısıtılmış termoplastik model malzemesi ile beslenir. Kafa, model ve destek malzemesini yönlendirerek hassas bir şekilde makine üretim tablasına ince katmanlar halinde serer. Sistem üzerindeki ekstrüzyon kafası her defasında bir katmanın konturunu çizecek ve içini dolduracak şekilde x ve y eksenlerinde; eş zamanlı olarak üretimin yapıldığı tabla da z yönünde hareket eder. Bu proses, sıcak yapıştırıcı tabancasının eriyik yapıştırıcı damlacıklarını sermesini andırır. Katman katman serilen malzemenin soğuyarak katlaşması ile üç boyutlu model oluşturulur (Şekil 1).



Copyright © 2008 CustomPartNet

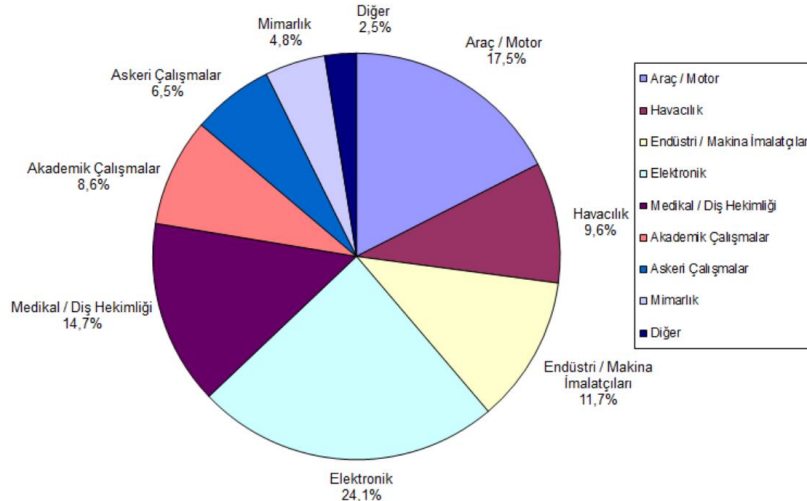
Şekil 1. FDM çalışma prensibi (FDM working principle ) (Fused, 2018)

Üç boyutlu yazdırma işleminde nesne katmanlar halinde üst üste serilerek meydana getirilir. Bu katmanları oluşturmak için farklı yöntemler kullanılabilir. Bunlar plastik ergitme, lazer sinterleme, sterolitografi gibi yöntemlerdir (Azari, 2009). Üç boyutlu yazıcıların kartezyen yazıcı, delta yazıcı ve core xy yazıcı gibi çeşitleri bulunmaktadır. Kartezyen mantığında çalışan üç boyutlu yazıcılar genellikle bilgisayar kontrollü xyz kartezyen platformuna bağlanmış termoplastik püskürtücüden oluşurlar [Herrmann, 2014, Üç boyutlu, 2014].

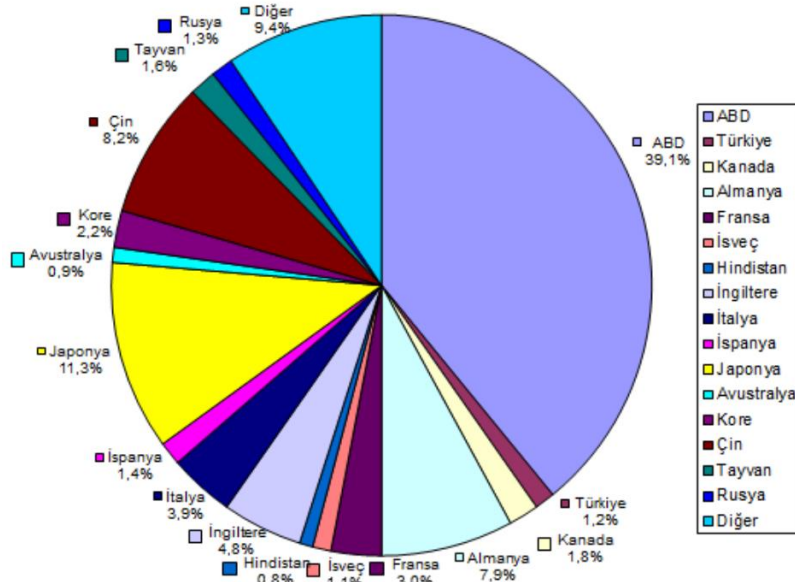
Üç boyutlu yazıcılarda yaygın bir şekilde kullanılan malzemelerin başında ABS ve PLA malzemeleri gelmektedir. ABS plastik (Akrilonitril Butadin Stiren), sert bir termoplastik polimerdir. ABS yüksek dayanım ve darbe direnci nedeniyle üç boyutlu yazıcılarda sıkça tercih edilen bir malzeme türüdür (Turner, 2014).

Yöntemlerdeki gelişmeler kullanım alanlarının çeşitlenmesini sağlamıştır (Şekil 2). Ayrıca avantajlarının anlaşılması ile birlikte de doğrudan kullanılan parça üretimine yönelik olarak gelişme göstermiştir. Ülkemizde hızlı prototipleme sistemleri 1993 yılından itibaren kullanım alanı bulmuştur. İlk kullanım alanı beyaz eşya sektörü olan hızlı prototipleme sistemleri zamanla tüm dünyadaki gelişmelere paralel olarak otomotiv, savunma sanayi, eğitim, sağlık, mimarlık, kuyumculuk, sanat gibi birçok farklı alanda kullanılır duruma gelmiştir (Drstvenssek, 2009, Negis, 2009, Akipek, 2007).

Ülkemiz, kurulu hızlı prototipleme sistemlerine sahip dünyadaki sayılı ülkelerden biridir (Şekil 3). Fakat daha gelişme gösterecek bir sektör durumundadır.



Şekil 2. Hızlı prototipleme makinalarının kullanım alanları (Usage areas of rapid prototyping machines) (Wohler,2010)



Şekil 3. Kurulu hızlı prototipleme makinaları (Rapid prototyping machines installed) (Wohler,2010)

Üç boyutlu yazıcı ile fare üzerinde deneylerin gerçekleştirilebilmesi için parçalar basılmıştır. Bu parçaların birleştirilip deney düzeneğinin kurulmuştur (Azari, 2009). Hızlı prototipleme ile üretimin dünyadaki geleceği hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Hızlı prototipleme, sanayiye ve çeşit alanlardaki firmalara hızla kalkınıp gelişeceği imkânlar sunacağı öngörülmüştür (Wohler, 1995, Kochan, 1999).

Üç boyutlu yazıcı teknolojileri yeni bir ürün tasarlayıp geliştirme süreçlerinde meydana gelebilecek olan problemleri önceden görülmesini sağlayarak bu gibi problemlere üretilecek çözüm yollarını hızlandırmaktadır. Dijital ortamda çizilmiş olan tüm tasarımların seri üretime geçme aşamasından önce prototiplerinin hazırlanıp, gerekli testlerden geçirilmesi gerekmektedir. Geleneksel yöntemlerle prototip hazırlama süreci hem maliyetli hem de oldukça zaman alıcı faaliyetleri kapsamaktadır. Oysa üç boyutlu yazıcılar sayesinde istenilen prototipler saatler içerisinde üretilebilir (Çelik, 2016).

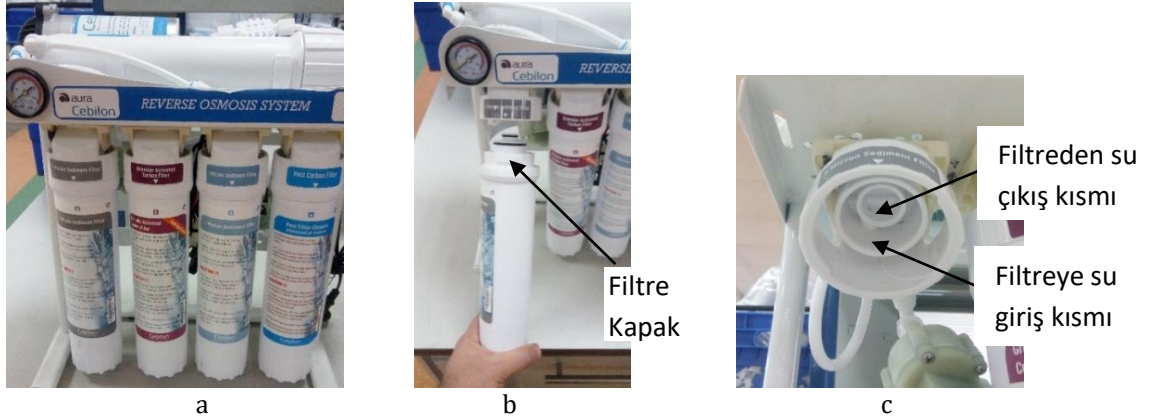
Hızlı prototipleme parçalarının, özellikle otomotiv ürün geliştirme sürecindeki kullanımları seri imalat sürecinde görülebilecek hataların, önceden görülerek önlem alınmasına katkı sağlamıştır (Durgun, 2011).

Hızlı prototipleme sayesinde tasarımı geliştirilen dikey süpürge prototipleri üretilerek parça montaj kontrolleri yapılmış ve ürün üzerinde ses ve toz atma testleri yapılarak ürün geliştirilmesi sağlanmıştır (Maden, 2019).

Bu çalışmada tasarımı geliştirilen çekvalfli housing kapak parçasının tasarımının geliştirilmesi, tasarımların prototipleri yapılması, prototip üzerinde testlerin yapılması ve sistemin üretimi için gerekli maliyet analizleri yapılması hedeflenmiştir.

## 2. Housing Kapak Parçasından Filtre Çıkartılmasında Su Kaçak Olması (Water Leakage When Removing Filter From Housing Cover Part)

Su arıtma cihazlarında filtrelerin ömürleri bittiğinde ( filtreden geçen su miktarı veya zamana bağlı olarak) değiştirilmesi gerekmektedir. Filtrelerin değişiminde filtre housing kapaktan çıkarılırken sistem içerisinde su basınç sayesinde housing kapak üzerinden dışarı çıkmaktadır. Bu da halılara, parke marleye ve cihazın konulduğu mobilyalara zarar vermektedir. Şekil 4-a'de su arıtma cihazı görülmekte ve Şekil 4-b'de cihazdan filtrenin dökülmesi görülmektedir. Şekil 4-c'de housing kapak parçasının filtreye su giriş ve filtreden su çıkışının geçtiği kısımlar görülmektedir.

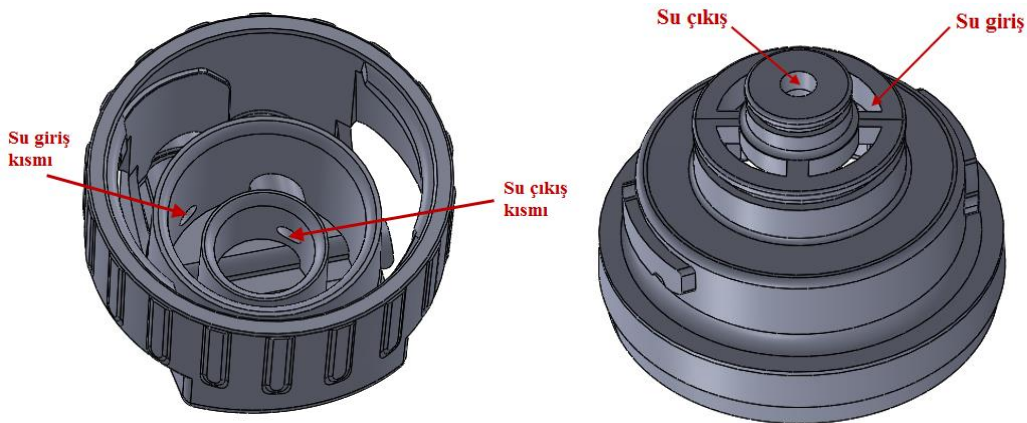


Şekil 4. (a) Su arıtma cihazı (Water purifier) (b) Filtre değişimi (Filter replacement) (c) Housing kapak parçasının su kaçak bölgesi (Water leak field on the housing cover piece)

Housing kapaktan filtrelere su girişi ve çıkışı olmakta fakat filtrelerin çıkartma işlemi sonrası su kaçaqları giriş kısmından olduğu görülmüştür. Çıkış kısmından herhangi bir kaçak olmadığı görülmüştür.

## 3. Housing Kapak Parçasının Tasarımının Çekvalfli Şekilde Geliştirilmesi (Development of the Housing Cover Part Design with a Check Valve)

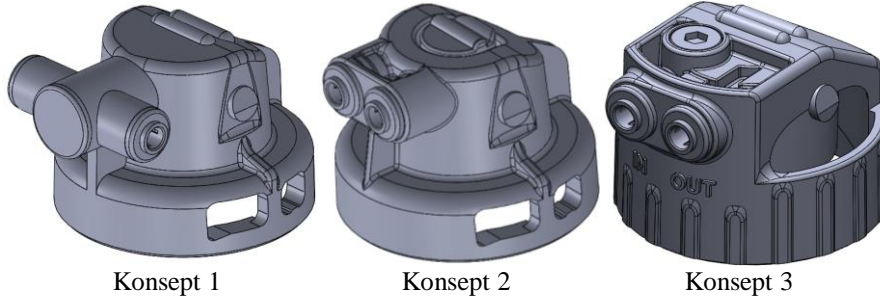
Ömrünü tamamlayan filtre değişiminde giriş kısımdan su kaçaqların önlenmesi için giriş kısmına çekvalf sistemi yapılması karar verilmiştir. Şekil 5'de görüldüğü gibi filtreye su girişi dış çaptaki dar alandan olmakta, filtreden geçen su merkezden geçmektedir. Şekil 5'de bu kısım daha detaylı görülmektedir.



Şekil 5. Housing kapak parçası su giriş/çıkış detayı (Housing cover part water inlet / outlet detail)

Housing kapak parçası çekvalfli olarak geliştirilmesi amacıyla 3 farklı tasarım yapılmıştır. Bu tasarımlar şekil 6'de gösterilmiştir.



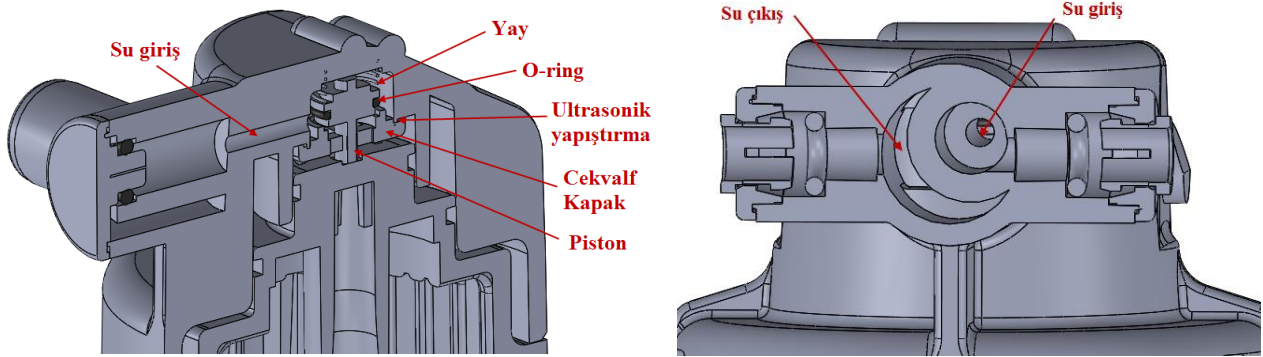


Şekil 6. Konsept çalışmaları (Concept studies)

Housing kapak parçası çekvalfli olarak geliştirilmesinde piyasada yapılan incelemelerde konsept 1 konsept 3'e yakın çekvalf sistemleri kullanıldığı görülmüştür. Piyasadaki ürünlerde bazıları çekvalf sistemi su girişi yerine çıkış kısmına konulduğu görülmüştür.

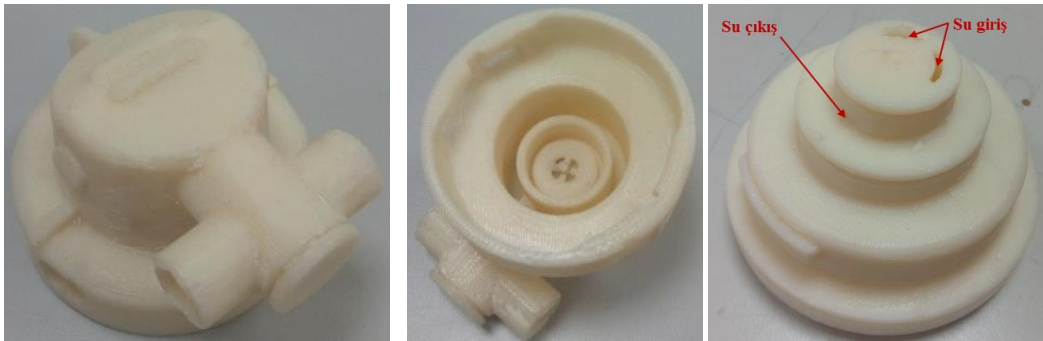
### 3.1. Konsept Prototip Üretimi ve Maliyet Analizi (Concept Prototype Production and Cost Analysis)

Konsept 1'de çekvalf sistemi geliştirilmesinde yandan dış çaptan olan su girişi merkeze, merkezde olan su çıkış kısmı dış kısma olacak şekilde yer değiştirilmiştir. Çekvalf sisteminin iç çaptaki alana rahat uygulanması (ultrasonik kaynak, mekanizma montajı gibi) için iç çap %15 oranında büyütülmüştür. Su giriş ve çıkış kısımlarında değişiklik yapıldığından dolayı filtre kapak parçasında su giriş ve çıkış kısımlarında değişiklik yapılmıştır. Şekil 7'de konsept 1'e ait çekvalf sistemi ve su giriş/çıkışlar görülmektedir.



Şekil 7. Konsept 1 çekvalfli housing kapak sistemi (Concept 1 check valve housing system)

Konsept 1 parçasının mühendislik tasarım çalışması yapıldıktan sonra FDM 360MC makinasında prototipleri üretilmiştir. Şekil 8'de üretimi yapılmış prototip parçaları görülmektedir.



Şekil 8. Konsept 1 prototip üretilmiş hali (Concept 1 prototype produced)

Konsept 1 parçasının prototip üretimi yapıldıktan sonra parçaların birbiriyle montajı yapılmıştır. Çekvalf sisteminde kapak ile housing gövde parçasına ultrasonik kaynak ile yapıştırılmaktadır. Prototip parçalarında üretim yönteminden dolayı ultrasonik ile birleştirme yapılması mümkün olmamaktadır. Çekvalf sisteminde yapıştırılmasında japon yapıştırıcı kullanılmıştır. Japon yapıştırıcı olarak "Evo Bond 502" kullanılmıştır. Prototip parçasının yüzeyleri düzgün çıkmadığı için yapıştırıldıktan sonra bile yüzeyde boşluklar olmaktadır. Bu kısımlardan azda olsa su kaçaqları meydana gelmektedir. Çekvalf kapak yapıştırılırken kenarlarına sıcak silikon ile kaçaqların engellenmiştir. Şekil 9'da konsept 1'in montajlanmış hali görülmektedir.





**Şekil 9.** Konsept 1 prototip montaj edilmiş hali (Concept 1 prototype assembled)

Konsept 1 parçasının prototip montajı yapıldıktan sonra parça üzerinde testler yapılmıştır. Bu testler filtreler çıkartılırken çekvalf sisteminin su kesme işlevini gerçekleştirmesi ve çekvalf sistemi devre dışı olduğunda geçen su debi miktarı ölçümleri yapılmıştır. Tablo 1’de yapılan test sonuçları görülmektedir.

**Tablo 1.** Konsept 1 çekvalf sistemi geçen su miktarı (Concept 1 check valve system passing water amount)

	Su geçiş miktarı (L/dk)	Çekvalf Sistemi Çalışması
<b>Konsept 1</b>	6	Çekvalf sistem çalışıyor. Su kaçağı yok.

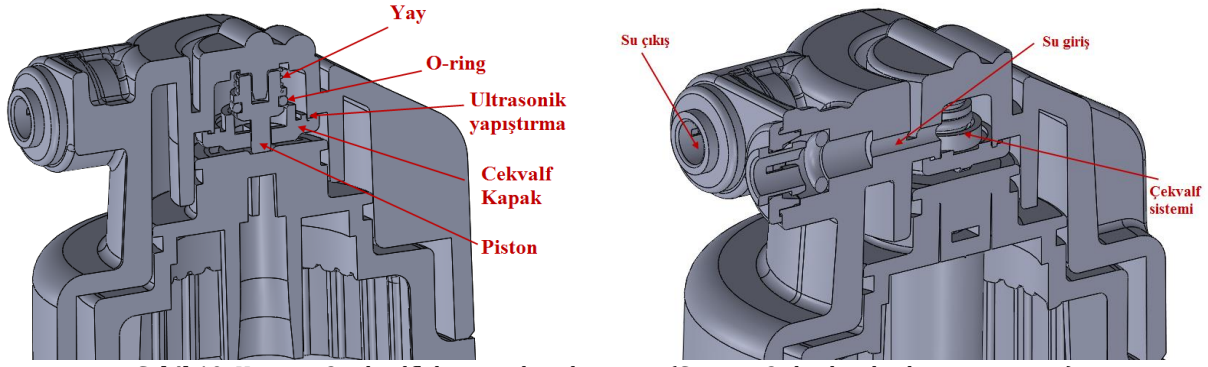
Normalde su arıtma sisteminde arıtma performansı dakikada 0,4 L atık ve yaklaşık 0,4-0,5 L temiz su vermektedir. Filtrede geçen debi dakikada yaklaşık 1 litreden az olmaması gerekmektedir. Konsept 1’e yapılan testler sonucunda bu miktarın yüksek olduğundan su geçişinde sorun olmayacağı düşünülmektedir. Bir ürünün tasarımın işlevselliği kadar yatırım maliyeti de önemlidir. Konsept 1’in imalata geçilmesi için kalıp yatırım maliyeti Tablo 2’de gösterildiği gibi 235 000 TL olacağı hesaplanmıştır.

**Tablo 2.** Konsept 1 kalıp yatırım maliyeti (Concept 1 mold investment cost)

Konsept 1 Çekvalfli Housing Kapak					
	Parça Resmi	Parça Adı	Parça Malzemesi	Göz Âdeti	Yeni Kalıp Maliyeti
1		Housing Kapak	POM	2	100.000 ₺
2		Filtre Kapak	PP	2	70.000 ₺
3		Housing Çekvalf Piston	POM	8	20.000 ₺
4		Housing Çekvalf Kapak	POM	8	20.000 ₺
5		Housing Su Giriş-Çıkış Kapak	POM	8	25.000 ₺
<b>Toplam</b>					<b>235.000 ₺</b>

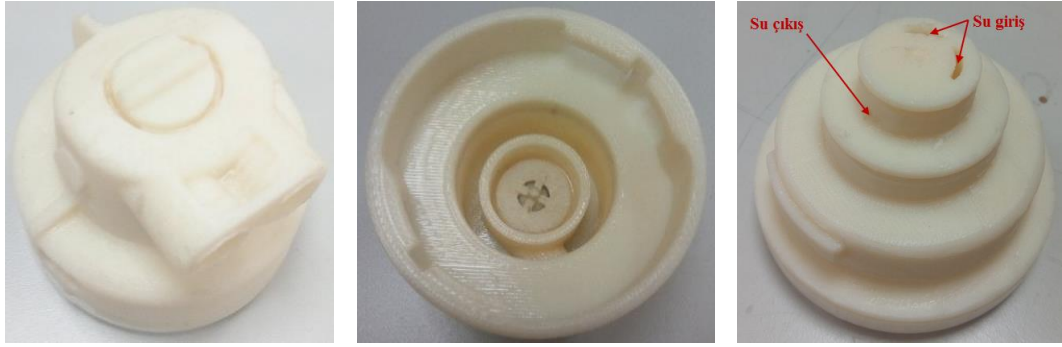
### 3.1. Konsept 2 Prototip Üretimi ve Maliyet Analizi (Concept 2 Prototype Production and Cost Analysis)

Konsept 2’de konsept 1’de olduğu gibi su giriş ve çıkış kısımlarında yer değişikliği yapılmıştır. Konsept 1’de olduğu gibi çekvalf sisteminin iç çaptaki alana rahat uygulanması (ultrasonik kaynak, mekanizma montajı gibi) için iç çap %15 oranında büyütülmüştür. Su giriş ve çıkış kısımlarında değişiklik yapıldığından dolayı filtre kapak parçasında su giriş ve çıkış kısımlarında değişiklik yapılmıştır. Şekil 10’da konsept 2’e ait çekvalf sistemi ve su giriş/çıkışlar görülmektedir.



Şekil 10. Konsept 2 çekvalfli housing kapak sistemi (Concept 2 check valve housing system)

Konsept 2 parçasının mühendislik tasarım çalışması yapıldıktan sonra FDM 360MC makinasında prototipleri üretilmiştir. Şekil 11'de üretimi yapılmış prototip parçalar görülmektedir.



Şekil 11. Konsept 2 prototip üretilmiş hali (Concept 2 prototype produced)

Konsept 2 prototip parçaları üretimi yapıldıktan sonra parçaların birbiriyle montajı yapılmıştır. Çekvalf sisteminde kapak ile housing gövde parçasına ultrasonik kaynak ile yapıştırılmaktadır. Prototip parçalarında üretim yönteminden dolayı ultrasonik ile birleştirme yapılması mümkün olmamaktadır. Çekvalf sisteminde yapıştırılmasında japon yapıştırıcı kullanılmıştır. Prototip parçasının yüzeyleri düzgün çıkmadığı için yapıştırıldıktan sonra bile yüzeyde boşluklar olmaktadır. Bu kısımlardan azda olsa su kaçaqları meydana gelmektedir. Çekvalf kapak yapıştırılırken kenarlarına sıcak silikon ile kaçaqların engellenmiştir. Şekil 12'de konsept 2'in montajlanmış hali görülmektedir.



Şekil 12. Konsept 2 prototip montaj edilmiş hali (Concept 2 prototype assembled)

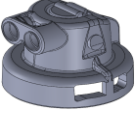

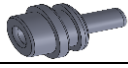
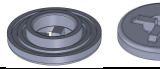
Konsept 2 parçasının prototip montajı yapıldıktan sonra parça üzerinde testler yapılmıştır. Bu testler filtreler çıkartılırken çekvalf sisteminin su kesme işlevini gerçekleştirmesi ve çekvalf sistemi devre dışı olduğunda geçen su debi miktarı ölçümleri yapılmıştır. Tablo 3'de yapılan test sonuçları görülmektedir.

Tablo 3. Konsept 2 çekvalf sistemi geçen su miktarı (Concept 2 check valve system amount of water passing)

	Su geçiş miktarı (L/dk)	Çekvalf Sistemi Çalışması
Konsept 2	8	Çekvalf sistem çalışıyor. Su kaçağı yok.

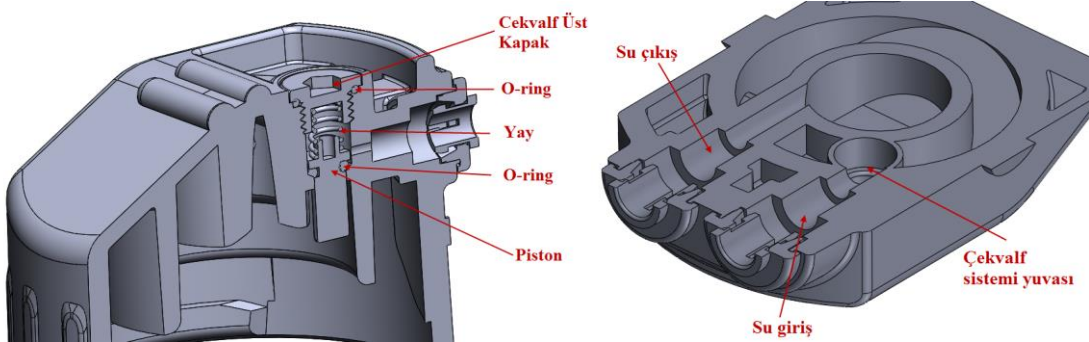
Normalde su arıtma sisteminde arıtma performansı dakikada 0,4 L atık ve yaklaşık 0,4-0,5 L temiz su vermektedir. Filtrede geçen debi dakikada yaklaşık 1 litreden az olmaması gerekmektedir. Konsept 2'e yapılan testler sonucunda bu miktarın yüksek olduğundan su geçişinde sorun olmayacağı düşünülmektedir. Bir ürünün tasarımın işlevselliği kadar yatırım maliyeti de önemlidir. Konsept 2'in imalata geçilmesi için kalıp yatırım maliyeti Tablo 4'de gösterildiği gibi 190 000 TL olacağı hesaplanmıştır.

**Tablo 4.** Konsept 1 Kalıp yatırım maliyeti (Concept 1 Mold investment cost)

Konsept 2 Çekvalfli Housing Kapak					
	Parça Resmi	Parça Adı	Parça Malzemesi	Göz Âdeti	Yeni Kalıp Maliyeti
1		Housing Kapak	POM	2	80.000 ₺
2		Filtre Kapak	PP	2	70.000 ₺
3		Housing Çekvalf Piston	POM	8	20.000 ₺
4		Housing Çekvalf Kapak	POM	8	20.000 ₺
<b>Toplam</b>					<b>190 000₺</b>

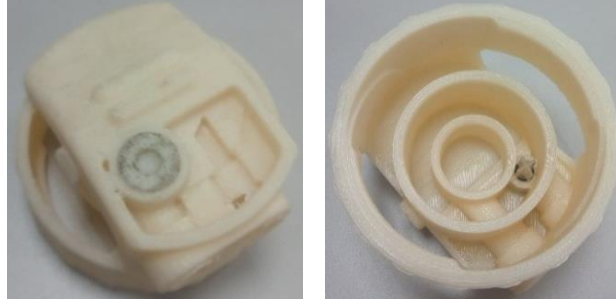
### 3.3. Konsept 3 Prototip Üretimi ve Maliyet Analizi (Concept 3 Prototype Production and Cost Analysis)

Konsept 3'de mevcut housing kapak tasarımı üzerinde çekvalf sistemi geliştirmesi yapılmıştır. Diğer konsept tasarımlarında su giriş ve çıkış kısımları yer değiştirirken konsept 3'te mevcut yapı aynı şekilde korunmuştur. Konsept 3'te su giriş kısmının olduğu kısma çekvalf piston eklenmiştir. Çekvalf piston parçasının üstünden takılarak montaj edilmektedir. Konsept 3'ün en büyük avantajı filtre kapak parçasında herhangi bir değişiklik olmamasıdır. Diğer konseptlerde filtre kapak parçasında değişiklikler yapılmıştır. Şekil 13'de konsept 3'e ait çekvalf sistemi görülmektedir.



**Şekil 13.** Konsept 3 çekvalfli housing kapak sistemi (Concept 3 check valve housing system)

Konsept 3 parçasının mühendislik tasarım çalışması yapıldıktan sonra FDM 360MC makinasında parçaların prototipleri üretilmiştir. Şekil 14'de üretimi yapılmış parçalar görülmektedir.



Şekil 14. Konsept 3 prototip üretilmiş hali (Concept 3 prototype produced)

Konsept 3 parçasının prototip üretimi yapıldıktan sonra çekvalf sistemi housing kapak parçasına montajı yapılmıştır. Şekil 15'da montajlanmış hali görülmektedir.



Şekil 15. Konsept 3 prototip montaj edilmiş hali (Concept 3 prototype assembled)


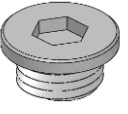
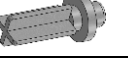
Konsept 3 parçasının prototip montajı yapıldıktan sonra parça üzerinde testler yapılmıştır. Bu testler filtreler çıkartılırken çekvalf sisteminin su kesme işlevini gerçekleştirmesi ve çekvalf sistemi devre dışı olduğunda geçen su debi miktarı ölçümleri yapılmıştır. Tablo 5'de yapılan test sonuçları görülmektedir.

Tablo 5. Çekvalf sistemi testi (Check valve system test)

	Su geçiş miktarı (L/dk)	Çekvalf Sistemi Çalışması
Konsept 3	16	Çekvalf sistem çalışıyor. Su kaçağı yok.

Normalde su arıtma sisteminde arıtma performansı dakikada 0,4 L atık ve yaklaşık 0,4-0,5 L temiz su vermektedir. Filtrede geçen debi dakikada yaklaşık 1 litreden az olmaması gerekmektedir. Konsept 3'e yapılan testler sonucunda bu miktarın yüksek olduğundan su geçişinde sorun olmayacağı düşünülmektedir. Bir ürünün tasarımın işlevselliği kadar yatırım maliyeti de önemlidir. Konsept 3'ün imalata geçilmesi için kalıp yatırım maliyeti Tablo 6'da gösterildiği gibi 125 000 TL olacağı hesaplanmıştır.




Tablo 6. Konsept 3 Kalıp yatırım maliyeti (Concept 3 Mold investment cost)

Konsept 3 Çekvalfli Housing Kapak					
	Parça Resmi	Parça Adı	Parça Malzemesi	Göz Âdeti	Yeni Kalıp Maliyeti
1		Housing Kapak	POM	2	80.000 ₺
2		Housing Çekvalf Üst Kapak	PP	2	25.000 ₺
3		Housing Çekvalf Piston	POM	8	20.000 ₺
<b>Toplam</b>					<b>125.000 ₺</b>

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

Su arıtma cihazlarında ömrünü tamamlayan filtrlerin değişimi sırasında housing kapak parçasında su kaçakları oluşmaktadır. Su kaçaklarını önlemek amacıyla housing kapaklara çekvalf sistemi eklenmesi düşünülmüştür. Bu amaçlar üç farklı çekvalfli housing kapak tasarım geliştirilmiştir. Bu geliştirilen tasarımlarının mühendislik tasarımları yapılmış ve prototipleri FDM yöntemi kullanarak üretimi yapılmıştır. Prototip parçaların birbiriyle birleştirilme yöntemleriyle (ultrasonik, sürtünme) kaynaklanması çok mümkün olmamaktadır. Prototip parçaların birleştirilmesinde japon yapıştırıcı, ara boşluklardan su kaçak olmaması için sıcak silikon kullanılarak montajlanmıştır. Daha sonra her konseptin uygulanması için kalıp yatırım maliyet analizleri ve su geçiş miktarı ölçümleri yapılmıştır. Tablo 7’de bütün konseptlerin verileri görülmektedir.

**Tablo 7.** Bütün konseptlerin verileri karşılaştırması (Data comparison of all concepts)

	Su Geçiş Miktarı (L/dk)	Parça Âdeti	Kalıp Maliyeti (TL)	Çekvalf Sistemi Çalışması	Piyasadaki Ürünlerin Etkilenmesi Durumu
 Konsept 1	6	5	235.000 ₺	Çekvalf sistem çalışıyor. Su kaçağı yok.	Piyasadaki ürünler için ayrı bir filtre yapılması gerekiyor.
 Konsept 2	8	4	190.000 ₺	Çekvalf sistem çalışıyor. Su kaçağı yok.	Piyasadaki ürünler için ayrı bir filtre yapılması gerekiyor.
 Konsept 3	16	3	125.000 ₺	Çekvalf sistem çalışıyor. Su kaçağı yok.	Piyasadaki ürünler hiçbir şekilde etkilenmemektedir.

Mevcut tasarım yapılan ürünler yurt içi ve dışına toplam 300 adet satışı yapılmıştır. Konsept 1 ve 2’de su girişi ve çıkışı kısımlarında değişiklik yapıldığından dolayı filtre kapak parçasının tasarımda değişiklik yapılmıştır. Filtre kapak tasarımı değişikliğinden dolayı satılan ürünler mevcut yapıda filtre kapak üretimi yapılması gerekmektedir. Bundan dolayı piyasada ki ürünler için filtre kapak parçası ve çekvalf sistemi için filtre kapak parçası stokları yapılması gerekmektedir. Bunun dışında çekvalf sisteminin kapakları dar alanda ultrasonik kaynak yapılacağı için operatör ve operasyon hatalarının yüksek olacağı tahmin edilmektedir. Bu da çekvalf sisteminden su kaçaklarına neden olacaktır. Ultrasonik kaynak sırasında oluşan operatör ve operasyon hatalarında housing kapak parçası kullanılmayacak duruma gelmektedir.

Konsept 3’de mevcut housing kapak parçasının üzerine çekvalf sistemi eklenmiştir. Filtre kapak parçasında herhangi bir değişiklik yapılmamış sadece housing kapak parçasında değişiklik yapılmıştır. Bu da satılan ürünlerin bu değişikliklerden etkilenmeyeceğini görülmüştür. Çekvalf sistemin kapağının montajı ultrasonik yerinde vidalı olduğundan dolayı operatör ve operasyon hataları daha az olacaktır. Çekvalf sistemi montajı sırasında oluşacak hatalara vidalı montajlamanın avantajı ile çökülüp hatalar düzeltilip tekrar montajlanabilmektedir.

Piyasada satılan ürünlerin etkilenmesi, iki ayrı filtre kapak parçası stok olmaması ve kalıp yatırım maliyeti az olmasında dolayı konsept 3 tasarımının imalata geçilmeye karar verilmiştir.

#### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

#### Kaynaklar (Resources)

- Çelik D, Çetinkaya K, Üç boyutlu yazıcı tasarımları, prototipleri ve ürün yazdırma karşılaştırmaları. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi. 2016;(5):0-0.
- Durgun İ, Otomotivde doğrudan dijital imalat. 12. Otomotiv ve Üretim Teknolojileri Sempozyumu 2011:0-0. Technology. <http://www.stratasys.com/Technology.aspx>. Accessed September 16, 2016.
- Erten M, Yağmur L, Hızlı Prototip Üretim Teknolojileri. Makina ve Metal Dergisi. 1997;(67): 76-97.
- Fused Deposition Modeling. <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>. Accessed September 3, 2018.
- Azari A, Nikzad S. The evolution of rapid prototyping in dentistry: a review. Rapid Prototyping Journal. 2009;(1):216 – 225.
- Herrmann K, Gärtner C, Güllmar D, Krämer M, JReichenbach JR. 3D printing of MRI compatible components: Why every MRI research group should have a lowbudget 3D printer. Medical Engineering & Physics. 2014:1373-1380.
- Üç Boyutlu Yazıcılar, “Kendini Kopyalayan Üç Boyutlu Yazıcı”. [www.3byazici.com](http://www.3byazici.com). Accessed January 12, 2014.

- Turner JBN, Strong R, S. Gold SA. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*. 2014:192- 204.
- Drstvensek I, Valentan B, Brajliah T, Strojnik T, Ihan Hren N. Direct Digital Manufacturing as Communication and Implantation Tool in Medicine. *Workshop on Rapid Technologies*. 2009:0-0.
- Negis E. A short History and Applications of 3D Printing Technologies in Turkey. *Workshop on Rapid Technologies*. 2009:0-0.
- Akipek FÖ, Inceoğlu N. Bilgisayar Destekli Tasarım ve Üretim Teknolojilerinin Mimarlıktaki Kullanımları. *YTÜ Mim. Fak. E-Dergisi*. 2007;(2): 0-0.
- Wohlers T. *Wohlers Report 2010*, Wohlers Associates, 2010.
- Wohlers T. Future potential of rapid prototyping and manufacturing around the World. *Rapid Prototyping Journal*. 1995:4-10.
- Kochan D, Chee Kai C, Zhaohui D. Rapid prototyping issues in the 21st century. *Computers in Industry*. 1999:3-10.
- Maden, H , Kamber, Ö . Siklonik Sistemli Elektrikli Dikey Süpürge Endüstriyel Tasarımı Ve Prototipi Üzerinde Testlerin Yapılması. *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi*, 2019:2 (1): 6-16.



## KİL BİR ZEMİNİN TAŞ KOLON YÖNTEMİYLE İYİLEŞTİRİLMESİNDE OPTİMUM ALAN YERLEŞİM ORANININ BELİRLENMESİ

Baki BAĞRIACIK\*

Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Drenajsız Davranış, Serbest Basınç Deneyi, Taş Kolon, Yumuşak Zemin, Zemin İyileştirmesi.</i>	Zemin iyileştirme yöntemlerinden olan ve son yıllarda git gide önem kazanan taş kolon uygulamaları yumuşak kil, silt ve gevşek kumların iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu iyileştirme yöntemi, taşıma gücünün artırılması, oturmaların azaltılması, sıvılaşma potansiyelinin azaltılması ve şevlerin stabiliteilerinin artırılması amacı ile kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, taş kolonların tasarımı yapılırken önem arz eden taş kolonlarda alan yerleşim oranlarının ( $A_c/A$ ) ve kolonlar arası mesafenin ( $s/d_c$ ) değişimi ile serbest basınç mukavemetlerinin belirlenmesi amacıyla laboratuvar model deneylerinin yapılması hedeflenmiştir. Farklı çaplarda oluşturulmuş kil numunesinin merkezine açılan sabit çaptaki dairesel boşluklara kum zemin yerleştirilerek taş kolonlar oluşturulmuş ve serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre göre, $A_c/A$ oranı 0.08 ve $s/d_c$ oranı 3.10 olması durumunda, en yüksek serbest basınç mukavemetine ulaşıldığı belirlenmiştir. Buna bağlı olarak $A_c/A$ ve $s/d_c$ oranlarının optimum değerlerinin yaklaşık olarak sırasıyla 0.08 ve 3.10 civarında olduğu bulunmuştur.

### DETERMINATION OF OPTIMUM AREA REPLACEMENT RATIO FOR IMPROVEMENT A CLAY SOIL WITH STONE COLUMN METHOD

Keywords	Abstract
<i>Soil Improvement, Soft Soil, Stone Column, Unconfined Compression Test, Undrained Behavior.</i>	It is an improvement method that has gained importance in recent years for the improvement of soft clay, silt and loose sand with stone columns. This healing method is used with the aim of increasing the bearing capacity, reducing settlements, reducing liquefaction potential and increasing slopes stability. In this study, it was aimed to perform laboratory model experiments in order to determine important stone column area replacement ratios ( $A_c/A$ ) and column spacing ( $s/d_c$ ). Stone columns were formed by placing a sand bed on the fixed circular cavities which opened to the center of the clay sample formed at different diameters and unconfined compression test was carried out. According to the results, when the $A_c/A$ ratio is 0.08 and the $s/d_c$ ratio is 3.10, it is determined that the highest bearing capacity has reached. Accordingly, optimum values of $A_c/A$ and $s/d_c$ ratios were found to be around 0.08 and 3.10 respectively.

#### Alıntı / Cite

Bağriacık, B., (2020). Kil Bir Zeminin Taş Kolon Yöntemiyle İyileştirilmesinde Optimum Alan Yerleşim Oranının Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 221-228.

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

B. Bağriacık, 0000-0002-1860-2881

#### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	15.11.2018
Revizyon Tarihi / Revision Date	03.09.2019
Kabul Tarihi / Accepted Date	04.10.2019
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2020

### 1. Giriş (Introduction)

Geoteknik mühendisliği ve ulaştırma mühendisliğinde, taşıma gücü ve oturma bakımından yetersiz zeminler üzerine inşa edilecek yapılarda, temel alanının projenin uygulanabilmesini etkileyecek boyutlara ulaşması

\* İlgili yazar / Corresponding author: bbağriacik@cu.edu.tr, +90-322-338-6702

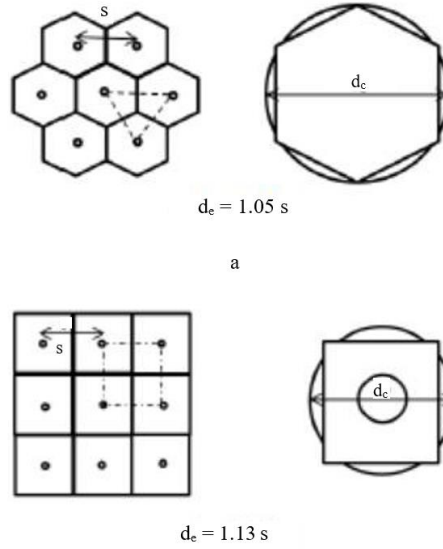


durumunda arazi zemin koşullarının iyileştirilmesi gerekli olabilmektedir. Son yıllara kadar, söz konusu projelerin geoteknik mühendisliği açısından değerlendirilmesi sonucu, yüzeysel temellerle güvenilir sonuçlar elde edilemeyeceğinin anlaşılması durumunda, ya proje sahasının değiştirilmesi ya da istenilen özelliklere sahip olmayan zeminin kaldırılarak yerine uygun zeminlerin kullanılması tercih edilmekteydi. Ancak son yıllarda bu iki durumda ekonomik olmaması ve artan nüfusa bağlı olarak azalan proje sahalarının kullanılması zorunluluğu nedeniyle çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri önerilmektedir. Zemin iyileştirme yöntemlerinde amaç, zeminin boşlukların çeşitli bileşimlerindeki karışımlarla doldurularak ya da mekanik araçlarla sıkıştırılarak azaltılması ile zemini taşıma gücü ve oturma bakımından istenilen özelliklere getirilmesidir. Zemin iyileştirmesi ile, mühendislik bakımından elverişli olmayan zeminin, proje sahasında öngörülen projenin yüklerini destekleyebilecek duruma getirebilmek için, toplam oturmanın azaltılıp konsolidasyon oturmasının hızlandırılması, zeminin sıvılaşma potansiyelinin azaltılması, zayıf zeminin taşıma kapasitesinin artırılması, zeminin permeabilitesinin azaltılması, dolgu ve şevlerin stabilitesinin sağlanması amaçlanmaktadır (Burke ve Sehn, 2003). Zemin iyileştirme yöntemlerinden taş kolon ile iyileştirme yapılması, derin zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olup, 1830'lu yıllarda Fransa'da uygulanmaya başlanmıştır (Osmanoğlu, 1999). Sonraki yıllarda ise sırasıyla Avrupa, Amerika ve ülkemizde de konu ile ilgili çalışmalar yapılmaya devam edilmektedir. Taş kolonlar ile zemin iyileştirmesi için analizler yapılırken, kolon çapı, yerleşim düzeni, kolon dolgu malzemesinin kayma mukavemeti açısı, alan yerleşim oranı (kolonlar arası mesafe), kolon zemin arasındaki gerilme konsantrasyon oranı, kolonun ve zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı (oturma azaltım oranı) gibi parametrelerin göz önünde bulundurulması önem arz etmektedir (Sayraç vd., 2014).

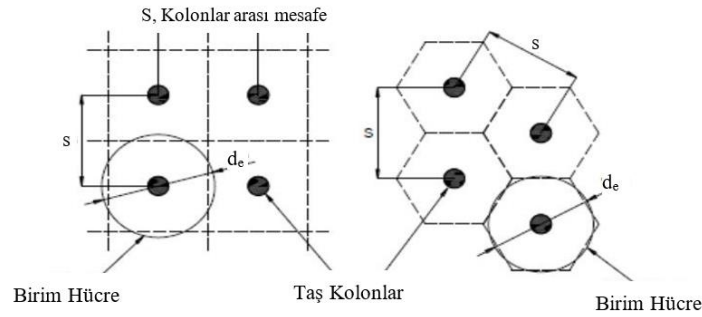
## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Zeminlerin taş kolonlar ile iyileştirilmesine yönelik geliştirilen birçok deney düzeneği ve tekniği literatürde yer almaktadır. Balaam vd. (1977), grup taş kolonların davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile belirleyebilmek amacıyla birim hücre yaklaşımını kullanmışlardır. Yapılan çalışmada, kolon uzunluğu, kolonlar arasındaki mesafenin değişiminin kolonların oturma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, kolonlar arası mesafenin kolon çapının 5 katından az olması durumunda oturma değerlerinde kayda değer azalmaların meydana geldiği görülmüştür. Barksdale ve Bachuc, (1983), üniform yüklü grup taş kolonlar için birim hücre yaklaşımını önererek, silindirik geometriye sahip hücrenin tüm sistem davranışını temsil ettiğini kabul etmişlerdir. Birim hücreyi oluşturan kolon ve kolonu çevreleyen zemini birlikte değerlendirmişler ve birim hücredeki kolon boyutlarının kolonlar arası mesafe ve kolonların yerleşim düzenine bağlı olarak değiştiğini ifade etmişlerdir. Yöntemde, taş kolon aralıkları üçgen yerleşim düzeni olduğunda kolon etrafında altıgen bir alan oluştuğu belirtilerek, bu altıgen bölgenin aynı alana sahip eşdeğer bir daireye dönüştürüldüğü ifade edilmiştir (Şekil 1.a). Burada, dairenin çapı, eşdeğer çap olup efektif çap olarak adlandırılmıştır. Kolonların kare yerleşim düzeninde olduğunda ise kolondan etkilenen alan kare kabul edilip aynı şekilde eşdeğer alana sahip bir daireye dönüştürüldüğü belirtilmiştir (Şekil 1.b). Birim hücreyi oluşturan dairenin eşdeğer efektif çapı ( $d_e$ ) kare ve eşkenar üçgen dizilimi için sırasıyla;  $d_e=1.13s$ ,  $d_e=1.05s$  ( $s$ : taş kolonlar arası mesafe) olarak belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, yüklerin sadece düşey yönde uygulandığı ve sınır koşulları etkisinin ihmal edilmesi durumunda bu yöntemin mantıklı sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Taş kolonların modellenmesinde birim hücre yaklaşımını kullanarak literatürde bir çok araştırmacı tarafından başarılı çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Priebe, 1995; Ambily ve Gandhi, 2007; Mirsalehi ve Bilsel, 2012; Adeli, 2013). Ambily ve Ghandi, (2007), kısa süreli yükleme koşullarında birim hücre analizlerinin grup kolonların sayısal analizinde başarılı sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Ancak, yöntemin en belirgin dezavantajı uygulanan yükün sadece düşey yönde olmasıdır. Farklı yükleme prosedürleri için önerilen diğer yaklaşımlardan biri kullanılmadığıdır. Han ve Ye, (2001), taş kolonlarla yapılan zemin iyileştirmesinde grup etkisini belirleyebilmek amacıyla birim hücre yöntemini kullanarak çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada, yapılan kabuller sırasıyla, birim hücrenin dairesel sınırının, rijit ancak tam pürüzsüz bir yüzeye sahip olması ve buna bağlı olarak dairesel sınır yanal yer değiştirme yapmaması ve sınırdaki kayma gerilmeleri oluşmaması; birim hücredeki kolon ve zeminin düşey oturmalarının eşit olması şeklinde açıklanmıştır. Birim hücreyi oluşturan taş kolonun kare ve eşkenar üçgen şekillerindeki dizilimleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Bağrıaçık ve Uysal, (2017), taş kolonlar arası mesafenin taşıma gücüne etkisini belirlemek amacıyla laboratuvarında model deneyler gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlara göre, kolonlar arası mesafenin  $s/d_c=3.91$  ( $s$ : kolonlar arası mesafe,  $d_c$ : taş kolon etki çapı) seçilmesi durumunda  $s/d_c=4.78$  seçilmesi durumuna göre taş kolon taşıma gücünde %9-%10 mertebelerinde artışlar meydana geldiği belirlenmiştir. Buradan, kolonlar arası mesafenin artmasının taş kolon taşıma gücünü azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, literatürde taş kolonların kısa süreli davranışlarının küçük ölçekli model numuneleri ile deneysel olarak araştırılmasına yönelik büyük ve küçük ölçekli laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Priebe, 1991; Cimentada ve Da Costa, 2009; Hughes ve Withers, 1974; Bae vd., 2002; Malarvizhi ve Ilamparuthi, 2004; Mckelvey

vd., 2004; Sivakumar vd., 2004; Andreou vd., 2008; Ali vd., 2011; Bağrıçık ve Uysal, 2017). Çalışma sonuçlarına göre, taş kolonların ortamın yük taşıma kapasitesinde kayda değer olarak artış sağladığı görülmüştür.



**Şekil 1.** Birim Hücre Yönteminde Taş Kolonların Kare ve Üçgen Dizilimleri (Adeli, 2013) (Square and Triangular Arrays of Stone Columns in Unit Cell Method, Adeli, 2013)

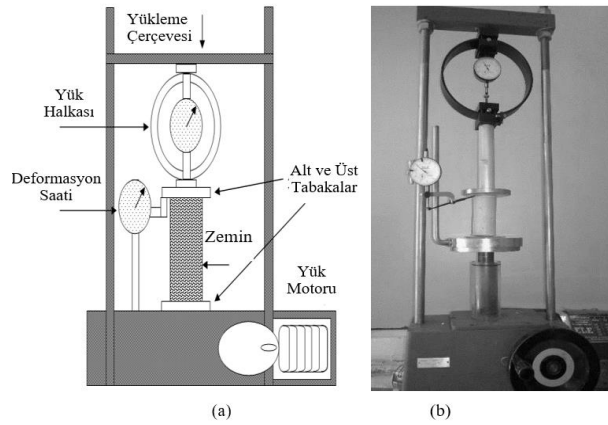


**Şekil 2.** Birim Hücre Yönteminde Taş Kolonların Kare ve Üçgen Dizilimleri (Han ve Ye, 2001) (Square and Triangular Arrays of Stone Columns in Unit Cell Method, Han ve Ye, 2001)

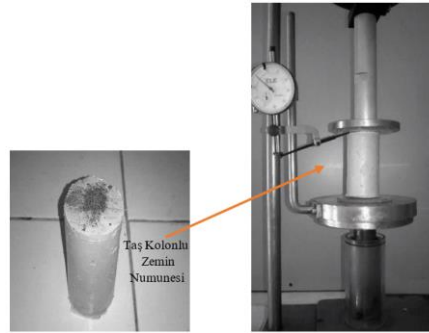
### 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Model deneyler, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği ve Geoteknik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılacak olan kil zemin araziden getirildikten sonra küçük parçalara ayrılmıştır. Ayrıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, 24 saat boyunca  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  sabit sıcaklıktaki etüvde tutularak içindeki zemin içindeki tüm su partikülleri uzaklaştırılmıştır. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra, bir öğütme makinesi yardımıyla öğütülerek, 10 no'lu bir elekten elenmiştir. Eleme işlemi tamamlandıktan sonra, zeminin mühendislik ve endeks özelliklerini bulmak için bir seri deney gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, zeminin sınıfı, TS 1500'e göre orta plastisiteli kil (CI) olarak belirlenmiştir. Daha sonra, kil zeminin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını bulabilmek amacıyla, sıkışma deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda, maksimum kuru birim hacim ağırlık  $17.40 \text{ kN/m}^3$  ve optimum su muhtevası %18.10 olarak belirlenmiştir. Kilin, likit limit değeri yaklaşık olarak % 42, plastik limit değeri yaklaşık olarak % 24 olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılacak olan kil için optimum su muhtevasında karışım hazırlanarak, kıvam homojenliğinin belirlenmesi amacıyla 24 saat kür odasında bekletilmiştir. Kili iyileştirmek için, taş kolon malzemesi olarak kum zemin seçilmiştir. Taş kolon malzemesinde kullanılacak kum zemin, TS 1500'e göre, kötü derecelenmiş temiz kum (SP) olarak belirlenmiştir. Kum zeminin dane dağılımı yaklaşık %53.6 ince taneli kum ve %46.4 orta tanelidir. Ayrıca, özgül ağırlık, minimum kuru özgül ağırlık ve maksimum kuru özgül ağırlık kumlu toprak sırasıyla sırasıyla  $26.80 \text{ kN/m}^3$ ,  $15.03 \text{ kN/m}^3$  ve  $17.06 \text{ kN/m}^3$  olarak hesaplanmıştır. Laboratuvar ortamında model taş kolonlar üretilirken ilk olarak, doğal kil zemin numunesi, iki parçalı kalıp yağlanarak çelik tübe yerleştirilmiştir. Kalıbın iki ağzından taşan zemin numunesi kıl testereyle kesilip atılmıştır. Daha sonra kil zemin numunesinin merkezi hassas olarak

belirlendikten sonra, çapı 1.0 cm ve ortası boş olan ince cidarlı metal çubuk yardımıyla kil numunelerine dikkatlice yerleştirilmiştir. Çapı 1.0 cm olan ince cidarlı metal çubuğun içindeki kil zemin temizlendikten sonra metal çubuk ta dikkatlice çıkarılmıştır. Daha sonra kil zemin ortasında oluşan boşluk hacmi hesaplanarak, kum zemin belirlenen sıklıkta, boşluk içerisine 3 tabaka halinde ve her tabakaya 25 vuruş denk gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Deneye tabi tutulacak, zemin numunelerinin boy/çap oranı 2 olacak şekilde oluşturulmuştur. Taş kolonlu zemin ortamı oluşturulduktan sonra, zemin ile taş kolon malzemesinin aderansının sağlanabilmesi amacıyla 3 gün süre ile desikatörde bekletildikten sonra deney numuneleri serbest basınç deneyine tabi tutularak taşıma güçleri belirlenmiştir. Deneylerde, zemin numunesinin presin alt plâtfonuna merkezlenerek oturtulmasından sonra üst başlığın numune üst yüzüne rahatça ve tam degecek şekilde indirilmesine standartta da (TS1900-2) belirtildiği gibi dikkat edilmiştir. Boy değişim ölçen komparatör saati, alt ve üst başlıklar arasına yerleştirilerek sıfırlanmıştır. Yükleme numunede dakikada % 0.5 - % 2 arası birim boy kısalması oluşturacak şekilde standartta belirtildiği (TS1900-2) gibi yapılmıştır. Deney düzeneği, deneylerde kullanılan temsili taş kolonlu-taş kolonsuz model zemin numuneleri ve araştırma parametreleri sırasıyla Şekil 3, Şekil 4 ve Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 3. Deney Düzeneği ve Detayları (Experimental Setup and Details)



Şekil 4. Model Numune Örneği (Model Sample Example)

Tablo 1. Araştırma Parametreleri (Research Parameters)

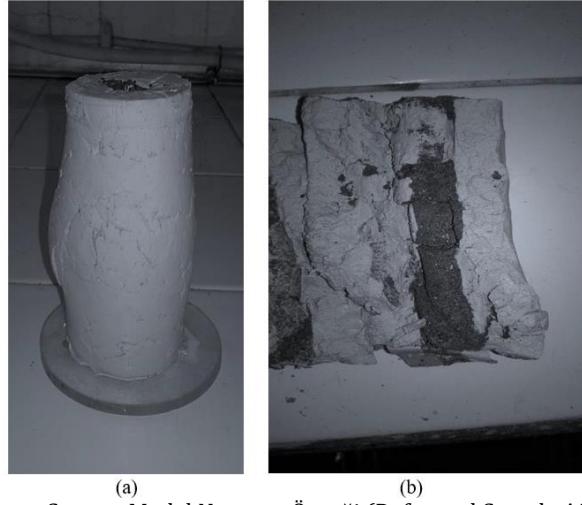
$s/d_c$	$A$ (cm <sup>2</sup> )	$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	$A_c/A$	$d_e/d_c$
1.77	3.14	0.785	0.25	2.0
2.22	4.91	0.785	0.16	2.5
2.66	7.06	0.785	0.11	3.0
3.10	9.62	0.785	0.08	3.5
3.55	12.56	0.785	0.06	4.0
4.43	19.63	0.785	0.04	5.0

(s: taş kolonlar arası mesafe,  $d_c$ : taş kolon çapı,  $A_c$ : taş kolon alanı, A: toplam hücre alanı,  $d_e$ : taş kolon etki çapı)

#### 4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

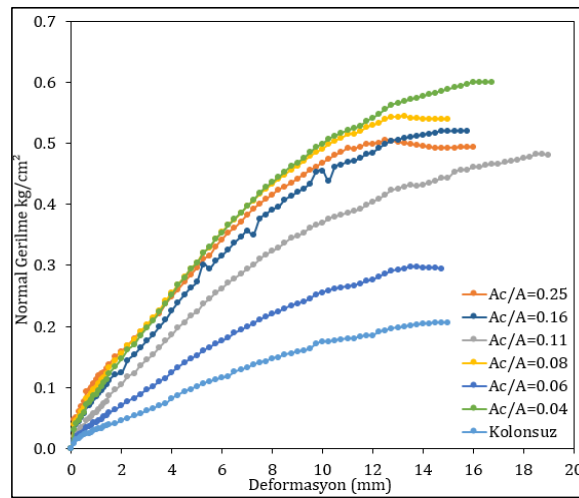
Bu çalışmada, uniform yüklü grup taş kolonlar için birim hücre yaklaşımı kullanılarak, silindirik geometriye sahip hücreler için, farklı kolonlar arası mesafeler ( $s/d_c$ : taş kolonlar arası mesafe/taş kolon çapı) ve farklı alan yerleşim oranları ( $A_c/A$ :taş kolon alanı/toplam hücre alanı) oluşturularak yapılan laboratuvar model deneyleri ile taşıma

güçlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, taş kolon aralıkları üçgen yerleşim düzeni olarak belirlenmiş ve taş kolon etrafında altıgen bir alan olduğu belirtilerek, bu altıgen bölgenin aynı alana sahip eşdeğer bir daireye dönüştürülerek alan oranları belirlenmiştir [10]. Birim hücreyi oluşturan dairenin eşdeğer efektif çapı (taş kolon etki çapı) ( $d_e$ ) kare dizilim için sırasıyla;  $d_e=1.13s$  olacak şekilde belirlenmiştir ( $s$ : taş kolonlar arası mesafe). Çalışma sonucunda yerleşim alan oranları ve kolonlar arası mesafe açısından optimum değerlerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda, deney numunelerinin yükleme sonrasındaki görüntüleri Şekil 5'te, elde edilen sonuçlar ise Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8 ve Tablo 2'de sunulmuştur.

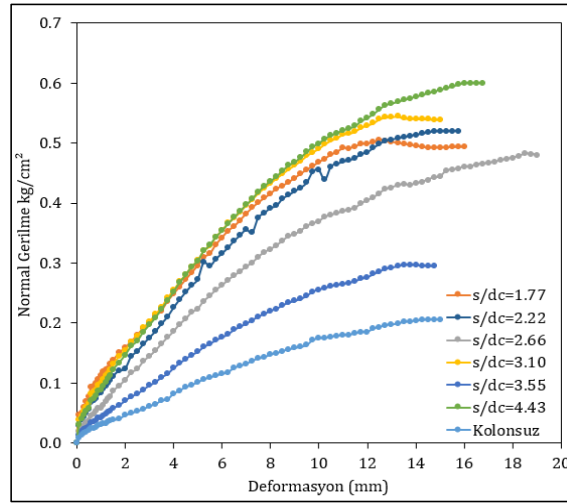


Şekil 5. Yükleme Sonrası Model Numune Örneği (Deformed Sample After Experiment)

Şekil 6 ve Şekil 7'den sırasıyla, serbest basınç deneylerinden elde edilen alan yerleşim oranları-normal gerilme eğrileri ve farklı kolon aralıkları-normal gerilme eğrileri görülmektedir. Bu eğrilerden serbest basınç mukavemetleri belirlenirken, eğrilerin yataya asimptot olduğu andaki değerler kullanılmıştır (Tablo 2). Sonuçlara göre, tüm grafiklerde, eğrilerin lineer olmayan bir davranış gösterdiği ve en küçük normal gerilme değerinin kolonsuz durumda meydana geldiği belirlenmiştir. Kolonlu durumdaki sonuçlara bakıldığında ise,  $A_c/A$  değerleri 0.25'ten 0.08'e kadar azalırken normal gerilme değerlerinin arttığı, 0.08'den 0.04'e kadar azalırken ise normal gerilme değerlerinin de azaldığı görülmüştür. Yine  $s/d_c$  değerleri 1.77'den 3.10'a kadar artarken normal gerilme değerlerinin de arttığı, 3.10'dan 4.43'e kadar arttığına ise normal gerilme değerlerinin de azaldığı görülmüştür.



Şekil 6. Alan Yerleşim Oranları için Serbest Basınç Deney Eğrileri (Unconfined Compression Results for Area Replacement Ratio)



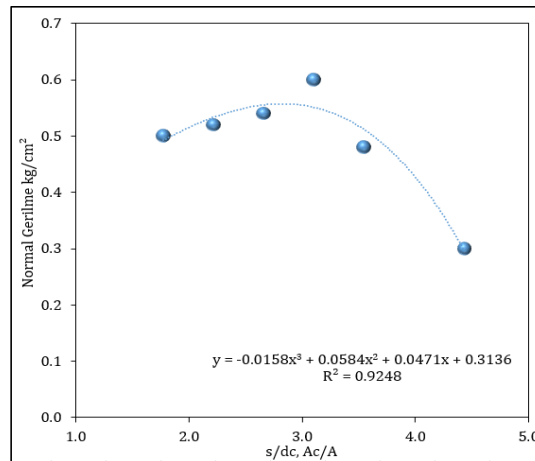
Şekil 7. Kolon Aralıkları için Serbest Basınç Deney Eğrileri (Unconfined Compression Results for Column Spacings)

Şekil 8’de farklı  $s/d_c$  oranları için serbest basınç mukavemetleri ve Tablo 2’de ise farklı  $A_c/A$  ve  $s/d_c$  oranları için serbest basınç mukavemetleri ve kohezyon değerleri görülmektedir. Serbest basınç mukavemetlerine göre,  $A_c/A$  oranı 0.08 ve  $s/d_c$  oranı 3.10 olması durumunda, en yüksek değerlere ulaşıldığı belirlenmiştir. Bunun sebebi ise, bu oranda ( $A_c/A$  oranı 0.08 ve  $s/d_c$  oranı 3.10) uygulanan düşey yüke bağlı olarak zemin ve taş kolon içerisinde oluşan gerilmelerin en fazla sönmüldüğü ve zemin-taş kolon arasında en iyi aderansın olduğu öngörülmektedir. Söz konusu oranların ( $A_c/A$  ve  $s/d_c$ ) daha yüksek ya da daha düşük olması durumlarında serbest basınç mukavemetlerinin de düştüğü görülmüş olup buna bağlı olarak  $A_c/A$  ve  $s/d_c$  oranlarının optimum değerlerinin yaklaşık olarak sırasıyla 0.08 ve 3.10 civarında olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, kolonsuz durumda yumuşak zeminin kohezyon değeri  $0.64 \text{ kg/cm}^2$  iken, taş kolonlarla iyileştirme sonucunda yine taş kolonlu zeminin kohezyon değerinin  $1.93 \text{ kg/cm}^2$ ’lere kadar artacağı belirlenmiştir.

Tablo 2. Serbest Basınç Mukavemetleri (Unconfined Compression Strength)

$A_c/A$	$s/d_c$	$q_u$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$c_u$ ( $\text{kg/cm}^2$ )
0.25	1.77	3.22	1.61
0.16	2.22	3.35	1.68
0.11	2.66	3.48	1.74
0.08	3.10	3.87	1.93
0.06	3.55	3.10	1.55
0.04	4.43	1.93	0.97
kolonsuz	kolonsuz	1.29	0.64

( $A_c$ : taş kolon alanı,  $A$ : toplam hücre alanı,  $s$ : taş kolonlar arası mesafe,  $d_c$ : taş kolon çapı,  $q_u$ : serbest basınç mukavemeti,  $c_u$ : kohezyon)



Şekil 8. Serbest Basınç Mukavemetleri (Unconfined Compression Strengths)

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

Bu çalışma kapsamında, taş kolonların tasarımı yapılırken, önem arz eden alan yerleşim oranlarının ve kolonlar arası mesafenin değişimi ile serbest basınç mukavemetlerinin belirlenmesi amacıyla laboratuvar model deneylerinin yapılması hedeflenmiştir. Yapılan deneyler sonrasında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Kolonsuz durumda yumuşak zeminin kohezyon değeri  $0.64 \text{ kg/cm}^2$  iken taş kolonlarla iyileştirme sonucunda ortamın kohezyon değerinin  $1.93 \text{ kg/cm}^2$ 'lere kadar arttığı belirlenmiştir.
2. Yerleşim alan oranları ( $A_c/A$ )  $0.25$ 'ten  $0.08$ 'e kadar azalırken normal gerilme değerlerinin arttığı ancak  $0.08$ 'den  $0.04$ 'e kadar azalırken normal gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür.
3. Kolonlar arası mesafe ( $s/d_c$ )  $1.77$ 'den  $3.10$ 'a kadar artarken normal gerilme değerlerinin de arttığı,  $3.10$ 'dan  $4.43$ 'e kadar arttığında ise normal gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür.
4. Serbest basınç mukavemetlerine göre,  $A_c/A$  oranı  $0.08$  ve  $s/d_c$  oranı  $3.10$  olması durumunda, en yüksek serbest basınç mukavemetine ulaşıldığı belirlenmiştir. Buna bağlı olarak  $A_c/A$  ve  $s/d_c$  oranlarının optimum değerlerinin yaklaşık olarak sırasıyla  $0.08$  ve  $3.10$  civarında olduğu düşünülmektedir. Bu oranda, uygulanan düşey yüke bağlı olarak zemin ve taş kolon içerisinde oluşan gerilmelerin en fazla sönümlendiği ve zemin-taş kolon arasında en iyi aderansın bu oranda oluştuğu öngörülmektedir.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2017-8425 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

## Kaynaklar (References)

- Burke, G., Sehn, A.L., 2003. The Influence of Ground Improvement on Geotechnical Design. ASCE/PENNDOT 20th Central PA Geotechnical Conference.
- Osmanoğlu, U., 1999. Yumuşak ve Gevşek Zeminlerin İyileştirilmesi: Yüksek Basıncılı Enjeksiyon Kolonları ve Taş Kolonlar. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sayraç, M. A., Kemalolu, H.F., Bal E. K., Öner L., Çetin, K. Ö., 2014. Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) Elemanlarının Deformasyon Temelli Tasarımı, İstanbul.
- Balaam, N. P., Poulos, H.G. and Brown, P. T., 1977. Settlement Analysis of Soft Clays Reinforced with Granular Piles. Proc. 5th Southeast Asian Conf. on Soil Engineering, Bangkok, Vol. 1, 81-91.
- Barksdale, R.D. ve Bachus, R.C., 1983. Design and Construction of Stone Columns Volume I, Federal Highway Administration Offices of Research and Development Report No. FHWA/RD-83/026-027.
- Priebe, H.J., 1995. "The Design of Vibro Replacement.", Ground Engineering, 1-13.
- Ambily, A. P., Gandhi, S. R., 2007. Behaviour of Stone Columns Based on Experimental and Fem Analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.133, pp.405-415.
- Mirsalehi, S., Bilsel H., 2012. Finite Element Modeling of Stone Columns in Alluvial Soils under an Embankment. 3th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Near East University, Nicosia, North Cyprus.
- Adeli, N., 2013. Taş Kolonların Analiz ve Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Han, J. and Ye, S.L., 2001. Simplified Method for Consolidation Rate of Stone Column Reinforced Foundation, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.127, pp.597-603.
- Bağrıçık, B. ve Uysal F., 2017, Taş Kolonlar Arası Mesafenin Taşıma Gücüne Etkisi, 2st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2017). (Özet metin bildiri)
- Priebe, H. J., 1991. Vibro Replacement - Design Criteria and Quality Control, Deep Foundation Improvements: Design, Construction and Testing. ASTM STP 1089, Philadelphia, 62-72.
- Cimentada, A., Da Costa A., 2009. Laboratory Experimental Analysis of Radial Consolidation Around a Stone Column. Geotechnics of soft soils: Focus on ground improvement, London: Taylorand & Francis Group; pp 213-217.
- Hughes, J. M. O., Withers, N. J., 1974. Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns. Ground Engineering. Vol. 7, No. 3, pp 42-49.
- Bae, W. S., Shin, B. W., And An, B. C., 2002. Behaviours of Foundation System Improved with Stone Columns. Proceedings of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan. 675- 678.
- Malarvizhi, S. N., Ilamparuthi, K., 2004. Load Versus Settlement of Claybed Stabilized with Stone & Reinforced Stone Columns. 3rd Asian Regional Conf. on Geosynthetics. Korea, 322-329.
- Mckelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A. L., and Graham, J., Modelling Vibrated Stone Columns in Soft Clay. Proc. Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2004. Vol. 157, No. 3, 137-149.
- Sivakumar, V., McKelvey, D., Graham, J., and Hughus, D., 2004. Triaxial Tests on Model Sand Columns in Clay," Can. Geotech. J. 41, 299 - 312.

- Andreou, P., Frikha, W., Canou, J., 2008. Papadopoulos, V., And Dupla, J. C., Experimental Study on Sand and Gravel Columns in Clay. Ground Improvement. Vol.161, pp.189-198.
- Ali, K., Shahu, J. T., and Sharma, K. G., 2011. An experimental Study of Stone Column in Soft Soils. An experimental study, Indian Geotechnical Conference. pp:375:378, Kochi.
- Bağrıaçık, B. ve Uysal F. 2017, Yumuşak Kildeki Tekil Kolonun Tek Eksenli Sıkışma Davranışı, International Advanced Researches and Engineering Congress. (Tam metin bildiri)
- TS 1500, İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması.
- TS 1900-2, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneylemleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini.





## N-HEKZADEKAN/MONTMORİLLONİT KOMPOZİT FAZ DEĞİŞTİREN MADDELERİN HAZIRLANMASI VE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Hatice Hande MERT<sup>1\*</sup>, Mehmet Selçuk MERT<sup>2</sup>, Emine Hilal MERT<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya ve Süreç Mühendisliği Bölümü, Yalova, Türkiye

<sup>2</sup> Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Yalova, Türkiye

<sup>3</sup> Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Polimer Mühendisliği Bölümü, Yalova, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Enerji,  
Isıl Enerji Depolama,  
Faz Değiştiren Maddeler,  
Mikrokapsülasyon,  
Termal Analiz.*

### Öz

Faz değiştiren maddeler (FDMler), ısı enerjisinin faz değişimi esnasında sabit sıcaklıkta gizli ısı olarak depolanmasına ve gerektiğinde ortama salınmasına izin veren önemli fonksiyonel malzemelerdir. Kimyasal bileşimine göre organik, inorganik ve ötektik olmak üzere sınıflandırılan faz değiştiren maddelerden organik faz değiştiren maddeler sınıfında yer alan parafinler, yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri, iyi faz değişim performansları, ısı ve kimyasal kararlılıklarıyla ısı enerji depolama uygulamalarında kullanım amacıyla oldukça dikkat çeken malzemelerdir. Ancak, bu malzemelerin faz değişimi esnasında gösterdikleri büyük hacim değişimi ve muhtemel sızdırma probleminden ötürü mikro ya da makro boyutta kapsülasyon işlemine gerek duyulmaktadır. Bunun yanı sıra, çeşitli yapıda nano dolgularla bu malzemelerin yapısal, kimyasal ve ısı olarak kararlılıklarının artırılması da mümkündür. Bu çalışmada, n-hekzadekan/modifiye montmorillonit kompozit faz değiştiren maddeler faz inversiyon emülsifikasyonu yöntemiyle hazırlanmıştır. Bu amaçla, faz değiştiren madde olarak n-hekzadekan, farklı katkı oranlarında emülsiyon sistemine ilave edilen, yüzey modifiye montmorillonit (MMT) kili varlığında poli(stiren-ko-divinilbenzen) kopolimer kabuk içerisinde mikro boyutta kapsüllenmiştir. Hazırlanan mikrokapsüllerin ısı, morfolojik ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Analiz sonuçları, elde edilen kompozit malzemelerin sahip oldukları ısı enerji depolama kapasiteleri ve uygun faz değişim sıcaklıkları yanında yüksek ısı kararlılıklarıyla düşük sıcaklıktaki (18-30°C) ısıtma ve soğutma sistemlerinde enerji depolanması amacıyla kullanılabilir potansiyel birer aday olduğunu göstermiştir.

## PREPARATION OF N-HEXADECANE/MONTMORILLONITE COMPOSITE PHASE CHANGE MATERIALS AND DETERMINATION OF ITS PROPERTIES

### Keywords

*Energy,  
Thermal Energy Storage,  
Phase Change Material,  
Microencapsulation,  
Thermal Analysis.*

### Abstract

Phase change materials (PCMs) are important functional materials that allow heat to be stored as a latent heat at a constant temperature during phase change and to be released into the environment as when needed. Within phase change materials classified as organic, inorganic and eutectic according to the chemical composition, paraffins in the class of organic phase change materials are highly remarkable materials for use in thermal energy storage applications due to their high latent heat storage capacities, good phase change performance, and with possessed thermal and chemical stability. On the other hand, micro- or macro-sized encapsulation is required due to the large volume changes and possible leakage problems of these materials during phase change period. Furthermore, it is possible to increase the structural, chemical and thermal stability of these materials with nano fillers of various structures. In this study, n-hexadecane / modified montmorillonite composite phase change materials were prepared by phase inversion emulsification method. For this purpose, n-hexadecane as the phase change material was encapsulated in micro-size in the poly(styrene-co-divinylbenzene) copolymer shell

\* İlgili yazar / Corresponding author: hndmert@yalova.edu.tr,+90-226-815-5397

in the presence of surface modified montmorillonite (MMT) clay, which was added to the emulsion system at different loading amounts. Thermal, morphological and structural properties of microcapsules were investigated. The results of the analysis showed that the obtained composite materials are the potential candidates for the storage of energy in heating and cooling systems operated at low temperature (18-30°C) on account of their thermal energy storage capacities and suitable phase change temperatures as well as their high thermal stability.

#### Alıntı / Cite

Mert, H.H., Mert, M.S., Mert, E.H., (2020). N-Hekzadekan/Montmorillonit Kompozit Faz Değiştiren Maddelerin Hazırlanması ve Özelliklerinin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 229-239.

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

H. H. Mert, 0000-0003-0743-1981  
M. S. Mert, 0000-0002-8646-0133  
E. H. Mert, 0000-0003-4267-7469

#### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	01.02.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	29.05.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	04.10.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Enerjinin korunumu, sürdürülebilirliği ve alternatif enerji kaynaklarının bulunması, son yıllarda sanayileşme ve nüfus artışıyla paralel olarak artan enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için önem arz etmektedir. Bu konuda sürdürülen çalışmalar içerisinde yer alan yeni enerji depolama malzemelerinin tasarlanması ve özelliklerinin iyileştirilmesi son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir. Enerji depolama malzemelerinden olan faz değiştiren maddeler (FDMler), ısı enerjinin gizli ısı olarak depolanmasına ve gerektiğinde ortama salınmasına izin veren malzemelerdir (Mert vd., 2018; Mert vd., 2019a, Mert vd., 2019b). Bu malzemeler erime periyodu esnasında ısı enerjisini depolarken, kristallenme periyodu esnasında tuttukları ısının ortama salınmasını sağlarlar. FDMler sahip oldukları enerji depolama kapasitesi ve faz geçiş sıcaklıklarına göre oldukça geniş uygulama alanı bulmaktadır (binalarda ısı konforun sağlanması, ısı düzenlemeli tekstil ürünleri, güneş enerjili sistemler, klima sistemleri, yalıtım malzemeleri vb.) (Alkan vd., 2011; Sarı vd., 2014a).

Faz değişim özelliği gösteren birçok malzeme bulunmaktadır. Bu malzemeler organik, inorganik ve ötektik olmak üzere genel olarak üç gruba ayrılmaktadır (Mert vd., 2018). Parafinler, organik FDM grubunda yer alan yüksek ısı depolama kapasitesi, kimyasal ve ısı kararlılığına sahip malzemelerdir. Bu malzemeler enerji depolama sistemlerinde uygun faz geçiş sıcaklıklarına sahip olmaları, düşük maliyetleri ve zararlı olmamaları sebebiyle sıklıkla tercih edilmelerine rağmen (Sarı vd., 2014b; Konuklu vd., 2015), ısı iletkenliklerinin düşük olması, kolay tutuşabilirlikleri ve faz geçişi esnasında görülen büyük hacim değişimleri gibi dezavantajlara da sahiptir (Zhao ve Wu, 2011; Zhou ve Zhao, 2011; Zhao ve Zhang, 2011). Son yıllarda yapılan çalışmalar, faz değişim periyodu süresince görülebilen sızdırma sorunu, hacim değişikliği ve düşük ısı iletkenlik gibi dezavantajların giderilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu malzemelerin makro, mikro ya da nano boyutta kapsüle edilmesiyle sızdırmanın önlenmesi, mevcut hacminin korunması, dış çevreyle olan etkileşiminin önlenmesi ve ısı aktarım yüzeyinin artırılması mümkün olmaktadır (Alkan vd., 2011; Zhao ve Zhang, 2011; Alkan vd., 2009; Özönur vd. 2006; Peng vd., 2017; Sami ve Etasami; 2017).

Polimerler FDMlerin kapsülasyon işlemi sıklıkla kullanılan maddelerdir. Bugüne kadar FDM olarak seçilen parafinlerin mikro ya da nano boyutta kapsüllenmelerinde üre-formaldehit (Lee vd., 2007), melamin-formaldehit (Alic vd., 2012), stiren-divinilbenzen (Hawlder vd., 2003), poli(metil metakrilat) (Alkan vd., 2011; Alkan vd., 2009; Ma vd., 2010; Sarı vd., 2009; Sarı vd., 2010) poli(butil metakrilat) (Yang vd., 2003), stiren-metil metakrilat kopolimeri (Sanchez-Silva vd., 2010), polistiren (Sarı vd., 2014a; Yang vd., 2003; Park vd., 2005; Sanchez vd., 2007; Sanchez vd., 2011; Borreguero vd., 2010; Konuklu ve Paksoy, 2017) tercih edilmiştir. Enkapsülasyonda tercih edilen polimerlerden biri olan polistiren düşük maliyetli, kolay işlenebilen ve ısı yalıtım özelliğine sahip bir termoplastik malzeme olarak ön plana çıkmaktadır (Sarı vd., 2014a).

N-hekzadekan (HD), faz değişim özelliği gösteren, C<sub>16</sub>H<sub>34</sub> formülüne sahip, uzun zincirli, düşük sıcaklıkta çalışan enerji depolama sistemleri için uygun bir parafindir. Literatürde HD'nin FDM olarak kullanıldığı farklı çalışmalar mevcuttur. Alay vd. (2009), ısı enerjisi depolama amacıyla poli(etil akrilat) kabukla üç farklı çapraz bağlayıcı varlığında (alil metakrilat, etilen glikol dimetakrilat, glisidil metakrilat) kapsüle edilmiş hekzadekan içeren mikrokapsüller hazırlamışlar ve üretilen mikrokapsülleri FT-IR, SEM ve DSC yöntemi ile karakterize etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, etilen glikol dimetakrilat ve glisidil metakrilat çapraz bağlayıcısı kullanılarak elde edilen mikrokapsüllerin daha yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olduklarını ve tekstil ürünleri için uygun olabileceğini belirlemişlerdir. Bir başka çalışmada, Lashgari vd. (2017), kabuk esnekliğinin kapsülasyon veriminde ve mikrokapsüllerin ısı performansında yapacağı değişimi görmek amacıyla süspansiyon polimerizasyonu yöntemiyle poli(metil metakrilat) ve poli(butil akrilat-ko-metil metakrilat) kabuk ile kapsüllenmiş hekzadekan

içeren mikrokapsüller hazırlamışlardır. Uygun kapsülasyon verimi, iyi termal özellikler ve esnek kabuk özelliği poli(butil akrilat-ko-metil metakrilat) kabuktaki butil akrilat içeriği ağırlıkça %25'in altında olduğunda elde edilmiştir. Fang vd. (2010), ısı enerji depolama malzemesi olarak alev geciktirici özelliği olan ve ısı olarak kararlı n-hekzadekan/silikon dioksit kompozitleri sol-jel yöntemiyle hazırlamışlardır. Hazırladıkları kompozitlere genişmiş grafit ekleyerek kompozitlerin termal kararlılıklarını arttırmışlardır. Kim vd. (2014) FDM olarak hekzadekanı grafitte emdirmek suretiyle enerji depolama malzemeleri hazırlamışlar ve bunları bina yapı ürünlerindeki performanslarını değerlendirmek amacıyla sıva malzemesine entegre etmişlerdir. Ardından, elde edilen bina yapı malzemesinin ısı performansını sayısal olarak ölçmüş ve bu malzemeyle kaplı duvarlardaki sıcaklık değişimlerinde azalma ve iç konfor sıcaklığında ise düzelme olduğunu saptamışlardır. Bir başka çalışmada araştırmacılar hekzadekanı kapsüllemek için biyoyakıt üretiminde yan ürün olarak ortaya çıkan ve yüksek derecede karbon içeren pirinç çeltiği kalıntısını kullanmışlar ve biyokütle temelli malzemelerin ısı enerjisinin geri kazanımı ve depolanması uygulamalarında kullanabilme potansiyelini ortaya koymuşlardır (Gondora vd., 2016). Konuklu vd. (2015) çeşitli alkanları (tetradekan, pentadekan, hekzadekan ve heptadekan) içeren poli(stiren-ko-etil akrilat) kabuklu nanokapsüller hazırlamışlar ve çekirdek/kabuk kütle oranının nanokapsüllerin faz değişim özelliklerinde yapacağı etkiyi araştırmışlardır. Buna göre en iyi çekirdek/kabuk oranı 3:1 olarak belirlenmiştir. Gao vd. (2010), hekzadekan mikrokapsülleri hazırlamada poliüre-melamin formaldehit reçineyi kabuk olarak kullanmışlardır. Hazırlanan mikrokapsüller sadece poliüre kabukla hazırlananlara kıyasla daha iyi ısı kararlılık ve performans göstermiştir. Sarıer ve Önder. (2007), FDM özelliği olan n-hekzadekan ve n-oktadekanı poliüretan köpüklerin yapısına katmış ve tasarlanan bu poliüretan köpüklerin sıcaklık dalgalanmalarına karşı termal yalıtım malzemesi olarak görev yapabileceğini rapor etmişlerdir.

Parafin esaslı FDMlerin, düşük ısı iletkenlik ve faz geçişi esnasında sızdırma gibi bazı dezavantajları söz konusu olmakla birlikte enkapsülasyonla ve çeşitli nanokatıkların yapıya dahil edilmesiyle yapısal, kimyasal ve ısı olarak kararlılıklarının iyileştirilmesi mümkün olmaktadır. Literatürde iyi ısı iletkenliğe sahip metal parçacıklar, metal oksitler, karbon nanotüpler, karbon fiber, grafit, grafen gibi nano boyuttaki katı parçacıkların ilavesi ile faz değişim maddelerinin ısı özelliklerinin iyileştirildiği çalışmalar bulunmaktadır (Liu vd., 2016). Bu nano parçacıkların dışında kil mineralleri de sahip oldukları makul ısı iletkenlik ve yüksek adsorplama özellikleriyle FDMlerin ısı özelliklerinin geliştirilmesinde tercih edilmektedir. Kaolin, diatomit, sepiolit, montmorillonit, perlit, SiO<sub>2</sub>, attapulgit, vermikulit ve uçucu kül gibi kil mineralleri, sahip oldukları yüksek spesifik yüzey alanı ve mükemmel gözenekli yapılarıyla kullanıldıkları yapılarda FDMlerin akma ve sızıntı problemini çözmektedir (Lv vd., 2017).

Montmorillonit (MMT), düzenli istiflenmiş yapıda, tetrahedral iki katman arasında bir oktahedral tabakadan meydana gelen ve bir tabakasının kalınlığı ortalama 1 nm olan simektik grubuna ait bir kildir (Alexandre ve Dubois, 2000). Hidrofilik özelliğe sahip birbirine çok yakın olan kil tabakaları, hidrofilik ve organofilik gruplara sahip ajanlarla modifiye edilerek kompozit malzeme hazırlamada kullanılmaktadır. İyon değiştirme işlemiyle gerçekleşen modifikasyon sonucu kil tabakaları arasındaki mesafe genişleyerek kilin organik matrisle uyumlaştırılması sağlanmaktadır. Literatürde MMT kili temelli kompozit faz değişim maddelerinin hazırlanması konusunda farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerde, MMT kili taşıyıcı olarak kullanılmakta ve modifikasyon sonrası tabakalar arası mesafenin artmasıyla faz değişim maddesinin daha fazla miktarda adsorplanması sağlanarak termal özellikleri iyileştirilmektedir (Lv. vd., 2017). Wang vd., MMT kilini taşıyıcı olarak kullanmış ve faz değişim maddesi eriterek emdirme yöntemi ve çözerek emdirme yöntemi ile kile entegre etmiştir (Wang vd., 2012). Bunun dışında literatürde, eritme ile harmanlama (Wang vd., 2012), vakumda emdirme (Chen vd., 2010; Sarı vd., 2014c; Chen vd., 2014). çözelti ile harmanlama gibi yöntemler de mevcuttur (Jeong vd., 2015).

Bu çalışmada, literatürden farklı olarak, n-hekzadekan (HD) yüzeyi modifiye edilmiş montmorillonit (m-MMT) kili varlığında faz inversiyon emülsifikasyonu yöntemiyle kapsüllenmiştir. Bu amaçla, emülsiyon sistemine farklı katkı oranlarında ilave edilen m-MMT kili varlığında, HD'nin poli(stiren-ko-divinilbenzen) kopolimer kabuk ile kapsüle edilmesi ile kompozit FDMler hazırlanmıştır. Elde edilen mikrokapsüllerin ısı özellikleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve termogravimetrik analiz (TGA) ile morfolojik özellikleri ve yapısı ise, sırasıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Fourier dönüşüm infrared spektroskopisi (FT-IR) ile karakterize edilmiştir. Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddeye (MKFDM'ye) farklı miktarlarda m-MMT nanodolgu ilavesinin elde edilen kompozit malzemenin ısı enerji depolama kapasitesinde, faz geçiş sıcaklıklarında, morfolojisinde ve termal dayanımında meydana getirdiği değişim araştırılmıştır.

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

### 2.1. Materyal (Material)

Stiren (St) (monomer, Merck, Darmstadt, Almanya), divinilbenzen (DVB) (çapraz bağlayıcı, %80, Aldrich Chemistry, Steinheim, Almanya), setil trimetil amonyum bromür (CTAB) (katyonik surfaktan, %98 Sigma), yüzey modifiye montmorillonit (m-MMT) (ağırlıkça %25-30 metil dihidroksietil hidrojen amonyum içeren nanokil,

Sigma-Aldrich, Almanya) ve n-hekzadekan (HD) (parafin, Merck, Darmstadt, Almanya) herhangi bir saflaştırma işlemi gerçekleştirilmeden alındığı gibi kullanıldı. 2,2'-azobisisobütironitril (AIBN) (başlatıcı, %98, Aldrich Kimya, Steinheim, Almanya) etanolden tekrar kristallendirme işlemi yapıldıktan sonra deneylerde kullanıldı. Yürütülen tüm seri deneylerde ultra saf deiyonize su kullanıldı.

## 2.2. Deneysel Yöntem (Experimental Method)

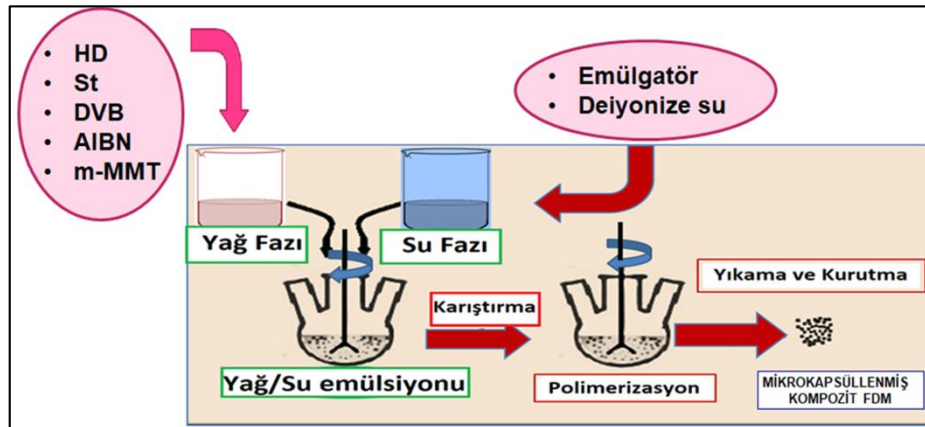
### 2.2.1. Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerin (MKFDMlerin) Hazırlanması (Preparation of Microencapsulated Phase Change Materials)

N-hekzadekan/ modifiye montmorillonit kompozit FDMler faz inversiyon emülsifikasyonu (Şekil 1) metoduyla hazırlanmıştır. Enkapsülasyonu yapılan FDMlere ait bileşim Tablo 1'de verilmiştir. Elde edilen FDMlerin çekirdek:kabuk oranı hacimce 1:1 olacak şekilde enkapsülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yağ fazı geri soğutucu ve dijital mekanik karıştırıcı bağlı üç boyunlu bir balon içerisinde St ve DVB, faz değiştiren madde HD, yağ bazlı başlatıcı AIBN (kabuk malzemenin hacimce %1'i oranında) ve m-MMTnin (çekirdek malzemenin ağırlıkça %0.5-3.0'ü arasında değişen oranlarda) oda sıcaklığında 350 rpm'de karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Ardından CTAB içeren su fazı hazırlanmıştır. Bu amaçla, 30 mmol CTAB 120 mL deiyonize suda dağıtılarak 10 dakika süre ile oda sıcaklığında manyetik karıştırıcıda karıştırılmış ve sonrasında 500 rpm de çalışan homojenizatörde iyice çözünmesi sağlanmıştır. Daha sonra hazırlanan su fazı oda sıcaklığında ve sabit karıştırma eşliğinde bir damlatma hunisi yardımıyla yavaş yavaş yağ fazına eklenerek emülsifikasyon gerçekleştirilmiştir. Ardından polimerleşmenin gerçekleşmesi için sıcaklık 70 °C'ye yükseltilerek hazırlanan emülsiyon sabit hızla 24 saat süreyle karıştırılmıştır. Süre sonunda elde edilen viskoz ürün oda sıcaklığına soğutularak damla damla etanolde çöktürülmüştür. Ardışık gerçekleştirilen süzme ve deiyonize suyla yıkama işlemleri sonrasında elde edilen kompozit malzemeler 40°C sıcaklıktaki sirkülasyonlu bir vakum etüvünde 24 sa süreyle kurumaya bırakılmıştır. Seri halde gerçekleştirilen denemelerde elde edilen farklı X oranlarında m-MMT katkılı Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddeler "MKFDM-%X m-MMT" olarak adlandırılmış, yukarıdaki prosedüre göre sentezlenen ancak hiç dolgu içermeyen mikrokapsüllenmiş FDM ise "MKFDM" kısaltmasıyla gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Kompozit FDMlerin kimyasal bileşimi (Chemical composition of composite PCMs)

Kompozit FDM	Kimyasal	Miktar
Çekirdek Malzeme	HD	10 mL
	St	9 mL
Kabuk Malzeme	DVB	1 mL
	Nanodolgu	Modifiye MMT



**Şekil 1.** m-MMT katkılı Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerin (MKFDMlerin) hazırlanması (Preparation of m-MMT doped Microencapsulated Phase Change Materials)

### 2.2.2. Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerin (MKFDMlerin) Karakterizasyonu (Characterization of Microencapsulated Phase-Change Materials)

Faz değiştiren madde olarak kullanılan HD'nin, dolgu içermeyen mikrokapsüllenmiş FDMnin (MKFDMnin) ve değişik katkı oranlarında nanodolgu içeren kompozit FDMlerin (MKFDM-%X m-MMT) gizli ısı depolama kapasiteleri (erime entalpisi,  $\Delta H_e$  ve kristallenme entalpisi,  $\Delta H_k$ ) ve faz geçiş sıcaklıkları (erime sıcaklığı,  $T_e$  ve kristallenme sıcaklığı,  $T_k$ ) azot ( $N_2$ ) atmosferi altında çalışan Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı (DSC

7020 HITACHI) ile -20 ila 80°C sıcaklık aralığında ve 10°C.dk-1 ısıtma/soğutma hızında ölçülmüştür. Boş poli(St-ko-DVB) kabuk malzemenin, HD, MKFDM ve en yüksek dolgu oranına sahip kompozit malzeme olan MKFDM-%3.0 m-MMT'nin ısıl dayanımları Seiko TG / DTA 6300, Seiko Instruments, Tokyo, Japan termal analiz cihazı yardımıyla azot (N<sub>2</sub>) atmosferi altında 0-600°C sıcaklık aralığında ve 10°C.dk<sup>-1</sup> ısıtma hızında belirlenmiştir. HD ve MKFDM-%3.0 m-MMT kompozit malzemesinin kimyasal yapıları Perkin Elmer Spectrum 100 FT-IR spektrofotometresi kullanılarak oda sıcaklığında 650-4000 cm<sup>-1</sup> dalga boyu aralığında kaydedilen FT-IR spektrumları ile karşılaştırmalı olarak ortaya koyulmuştur. Boş kabuk malzeme poli(St-ko-DVB) kopolimerinin, MKFDM ve en yüksek dolgu oranına sahip kompozit malzeme olan MKFDM-%3.0 m-MMT'nin morfolojik özellikleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (FEI Inc. Inspect S50 SEM-EDAX) ile belirlenmiştir. SEM görüntüleri kullanılarak CoralDRAWX8 programı ile elde edilen partikül boyut ölçüm verilerinden oluşturulan histogramlardan mikrokapsüllerin sahip oldukları partikül boyut dağılımları hesaplanmıştır.

### 3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

#### 3.1. Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerin (MKFDMlerin) Isıl Özelliklerinin Belirlenmesi (Determination of Thermal Properties of Microencapsulated Phase Change Materials)

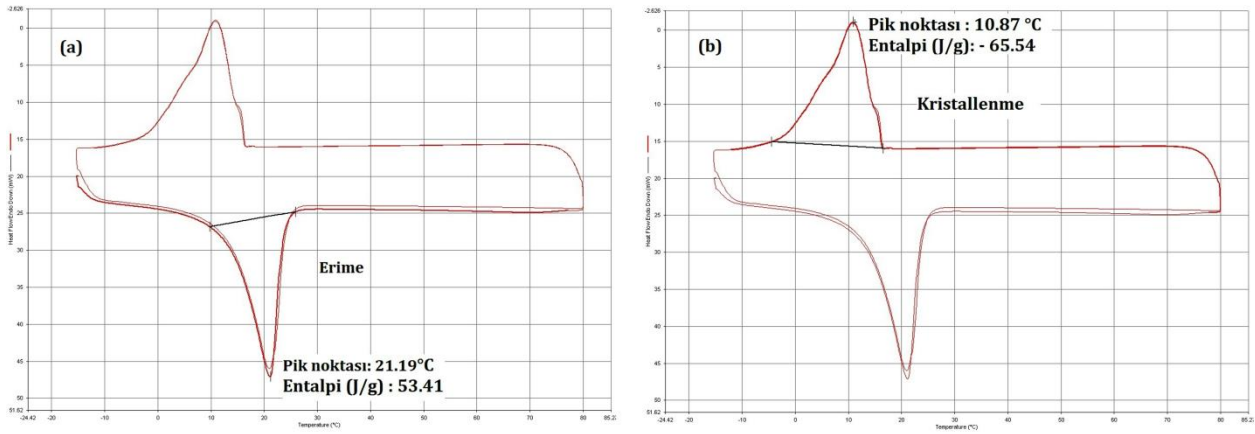
HD'nin ve mikrokapsüllenmiş kompozit FDMlerin DSC grafiklerinden elde edilen ısıl verileri Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'den görüldüğü üzere HD için erime ve kristallenme pik sıcaklıkları sırasıyla 25.51 °C ve 12.86°C olarak bulunurken, mikrokapsüllenmiş FDMler için bu değerlerin kapsüllenmeyle birlikte az da olsa değişim gösterdiği görülmüştür. Diğer yandan kompozit FDMlerin, dolgu içermeyen mikrokapsüllenmiş FDM'ye (MKFDM'ye) kıyasla pik erime ve kristallenme sıcaklıklarının, dolgu miktarıyla giderek arttığı, %3 dolgulamada ise saf HD'nin sahip olduğu pik erime ve kristallenme sıcaklığından bile daha düşük faz geçiş sıcaklıkları gösterdiği görülmüştür. Tasarlanan kompozit malzemeler içinde MKFDM-%3.0 m-MMT kompozitinin gösterdiği bu davranış, elde edilen ürünün düşük sıcaklıklardaki (18-30°C) ısıtma ve soğutma sistemlerinde enerji depolanması amacıyla kullanılabilme potansiyeli göz önüne alındığında istenen bir özelliktir. Dolayısıyla malzemenin kapsüllenmesiyle hem muhtemel sızdırma probleminin önüne geçilmiş hem de katılanan m-MMT sayesinde erime ve kristallenme pik sıcaklıkları saf HD'nin sahip olduğu değerlerin altına düşürülerek söz konusu uygulama alanı için istenen bir özellik elde edilmiştir. Diğer yandan numunelerin erime entalpileri karşılaştırıldığında HD'nin erime ve kristallenme entalpileri sırasıyla 191.18 J.g<sup>-1</sup> ve -192.56 J.g<sup>-1</sup> iken, kapsüllenme ve dolgu artışıyla erime ve kristallenme entalpi değerlerinin, DSC analizi değerlerinden hesaplanan hegzadekan içeriğinin ve çekirdek/kabuk oranının (ağır./ağır.) gittikçe azaldığı görülmüştür (Tablo 2). Elde edilen bu sonuç literatür ile uyumlu olmakla birlikte, poli(St-ko-DVB) kabuğun ve sisteme katılan dolgunun varlığından ileri gelmektedir. Özellikle, dolgu ilavesiyle daha belirgin gerçekleşen bu düşüş, faz değişim prosesinin etkilenmesinden kaynaklanmaktadır (Li vd., 2013). Yüksek yüzey alanına sahip dolgunun ilavesiyle yüksek derecede adsorpsiyon gerçekleşmekte ve FDM ile dolgu maddesi arasında artan kapiler etki ve yüzey gerilim kuvvetleri erime ve donma prosesleri esnasında FDM'nin moleküler hareketine engel olmaktadır (Khadiran vd., 2015; Li vd., 2017). Safsızlık gibi davranış gösteren dolgu malzeme üzerinde gerçekleşen FDM adsorpsiyonu sonucu, faz geçiş periyodu esnasında FDM kolaylıkla kristallenmemekte, bu durum artan dolgu miktarıyla entalpi de düşüşe neden olmaktadır (Feng vd.,2011). Benzer sonuçlar, Fan vd. (2013) çalışmalarında rapor edilmiş ve nanodolgunun varlığının saf FDM'e kıyasla faz değişim entalpilerinde neredeyse lineer bir düşüşe neden olduğu, faz değişim sıcaklıklarında çok büyük bir değişime neden olmadığını belirtmiştir.

Seri halde üretilen bu numuneler içinden MKFDM-%3.0 m-MMT'nin, sahip olduğu faz değişim sıcaklık değerleri ve makul ısıl depolama kapasitesiyle düşük sıcaklıklı ısıl enerji depolama uygulamaları için gerekli olan optimum şartları sağladığı belirlenmiştir. Söz konusu kompozit malzemenin DSC ısıtma ve soğutma eğrileri Şekil 2'de sunulmuştur.

Poli(St-ko-DVB) kopolimer kabuk malzemenin, HD'nin, mikrokapsüllenmiş FDM'nin (MKFDM) ve mikrokapsüllenmiş kompozit FDM'ler içinden seçilen MKFDM-%3.0 m-MMT'nin TGA ile elde edilen ısıl bozunmalarına ait sonuçlar Tablo 3'de, saf HD ile MKFDM-%3.0 m-MMT'nin ısıl bozunma eğrileri ise Şekil 3'de verilmiştir. Tablo 3'den görüldüğü gibi poli(St-ko-DVB) kabuk malzeme tek basamakta ısıl bozunmaya uğrayarak 382,5-450,8 °C sıcaklık aralığında ağırlığının %96,2'sini kaybetmektedir.

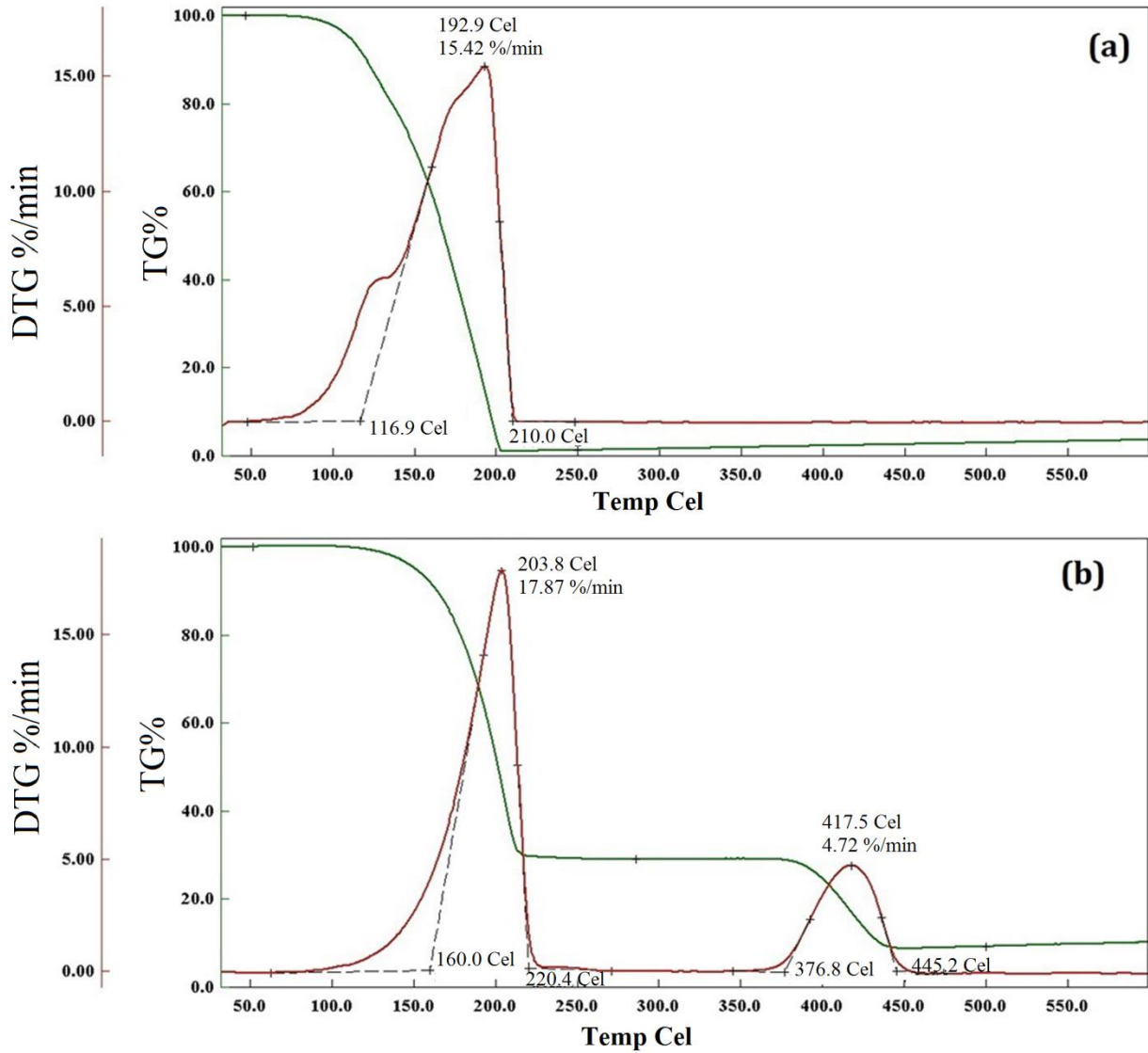
**Tablo 2.** HD'nin ve MKFDMlerinin DSC eğrilerinden alınan ısıl özellikleri (Thermal properties of HD and MKFDMs obtained from DSC curves)

Numune adı	Dolgu (%)	<sup>a</sup> T <sub>e</sub> (°C)	<sup>b</sup> ΔH <sub>e</sub> (J/g)	<sup>c</sup> T <sub>k</sub> (°C)	<sup>d</sup> ΔH <sub>k</sub> (J/g)	Hesaplanan Hekzadekan İçeriği (% ağır.)	Hesaplanan Çekirdek/Kabuk Oranı (ağır./ağır.)
HD	-	25.51	191.18	12.86	-192.56	-	-
MKFDM	0	23.54	131.07	14.61	-129.68	68.55	2.17
MKFDM-%0.5 m-MMT	0.5	23.91	72.10	16.05	-75.89	37.71	0.60
MKFDM-%1.0 m-MMT	1.0	24.70	66.50	16.52	-82.27	34.78	0.53
MKFDM-%3.0 m-MMT	3.0	21.19	53.41	10.87	-65.54	27.93	0.39

<sup>a</sup>DSC ısıtma eğrisinde pik erime sıcaklığı<sup>b</sup>DSC ısıtma eğrisinde erime entalpisi<sup>c</sup>DSC soğutma eğrisinde pik kristallenme sıcaklığı<sup>d</sup>DSC soğutma eğrisinde kristallenme entalpisi**Şekil 2.** MKFDM-%3.0 m-MMT kompozit faz değiştiren maddenin DSC (a) ısıtma ve (b) soğutma eğrileri (DSC(a) heating and (b) cooling curves of MKFDM- 3.0% m-MMT composite phase change material)**Tablo 3.** Poli(St-ko-DVB) kabuk malzeme, HD, MKFDM ve MKFDM-%3.0 m-MMT'nin TGA/DTG sonuçları (TGA / DTG results of poly (St-co-DVB) shell material, HD, MKFDM and MKFDM- 3.0% m-MMT)

Numune Adı	TGA bozunma aralığı 1. adım (°C)	DTG piki 1.adım (°C)	Yüzde ağırlık kaybı (%)	Maks. Ağırlık kaybı hızı (%.dk <sup>-1</sup> )	TGA bozunma aralığı 2. adım (°C)	DTG piki 2.adım (°C)	Yüzde ağırlık kaybı (%)	Maks. Ağırlık kaybı hızı (%.dk <sup>-1</sup> )
Poli(St-ko-DVB) Kabuk	-	-	-	-	382.5-450.8	418.9	96.2	21.28
HD	116.9-210.0	192.9	98.8	15.42	-	-	-	-
MKFDM	122.2-232.2	191.4	81.2	11.84	384.7-450.6	418.7	18.5	4.72
MKFDM-%3,0 m-MMT	160.0-220.4	203.8	71.0	17.87	376.8-445.2	417.5	19.8	4.72

Faz değiştiren madde olarak kullanılan saf HD de 116,9-210,0°C sıcaklık aralığında tek basamakta bozunmakta ve ağırlığının %98,8'ini kaybetmektedir (Şekil 3). Bununla birlikte mikrokapsüllenmiş FDM (MKFDM) ve %3 modifiye MMT içeren MKFDM-%3,0 m-MMT kompozitlerinin ısıl bozunmaları ise iki basamakta gerçekleşmektedir. MKFDM numunesinin çekirdek kısmında yer alan HD'nin bozunmasına karşılık gelen ilk ısıl bozunma basamağı 122,2-232,2°C sıcaklık aralığında gerçekleşirken, ağırlık kaybı %81,2 olmuştur. Buna karşın mikrokapsüllenmiş kompozit faz değiştiren madde MKFDM-%3,0 m-MMT'nin ilk ısıl bozunması 160,0-220,4 °C de gerçekleşmekte ve %71,0'lik bir ağırlık kaybı meydana gelmektedir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere ağırlıkça %3,0'lük m-MMT katkısı, dolgu içermeyen MKFDM'ye kıyasla mikrokapsüllerin ısıl bozunma başlangıç sıcaklığında yaklaşık 38°C'lik bir artış sağlayarak mikrokapsüllerin ısıl kararlılığında iyileşme sağlamıştır. Bundan başka MKFDM ve MKFDM-%3,0 m-MMT'nin sırasıyla 384,7-450,6°C ve 376,8-445,2 °C sıcaklık aralıklarında gerçekleşen ikinci ısıl bozunma adımlarının ise boş kabuk malzemeyle neredeyse aynı olduğu gözlenmiştir ve poli(St-ko-DVB) kabuk malzemenin bozunmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.



Şekil 3. HD(a) ve MKFDM-%3.0 m-MMT kompozit malzemenin (b) termogravimetrik analiz (TGA) ile elde edilen ısıl bozunma eğrileri (Thermal degradation curves obtained by thermogravimetric analysis (TGA) of (a) HD and (b) MKFDM-3.0% m-MMT composite material)

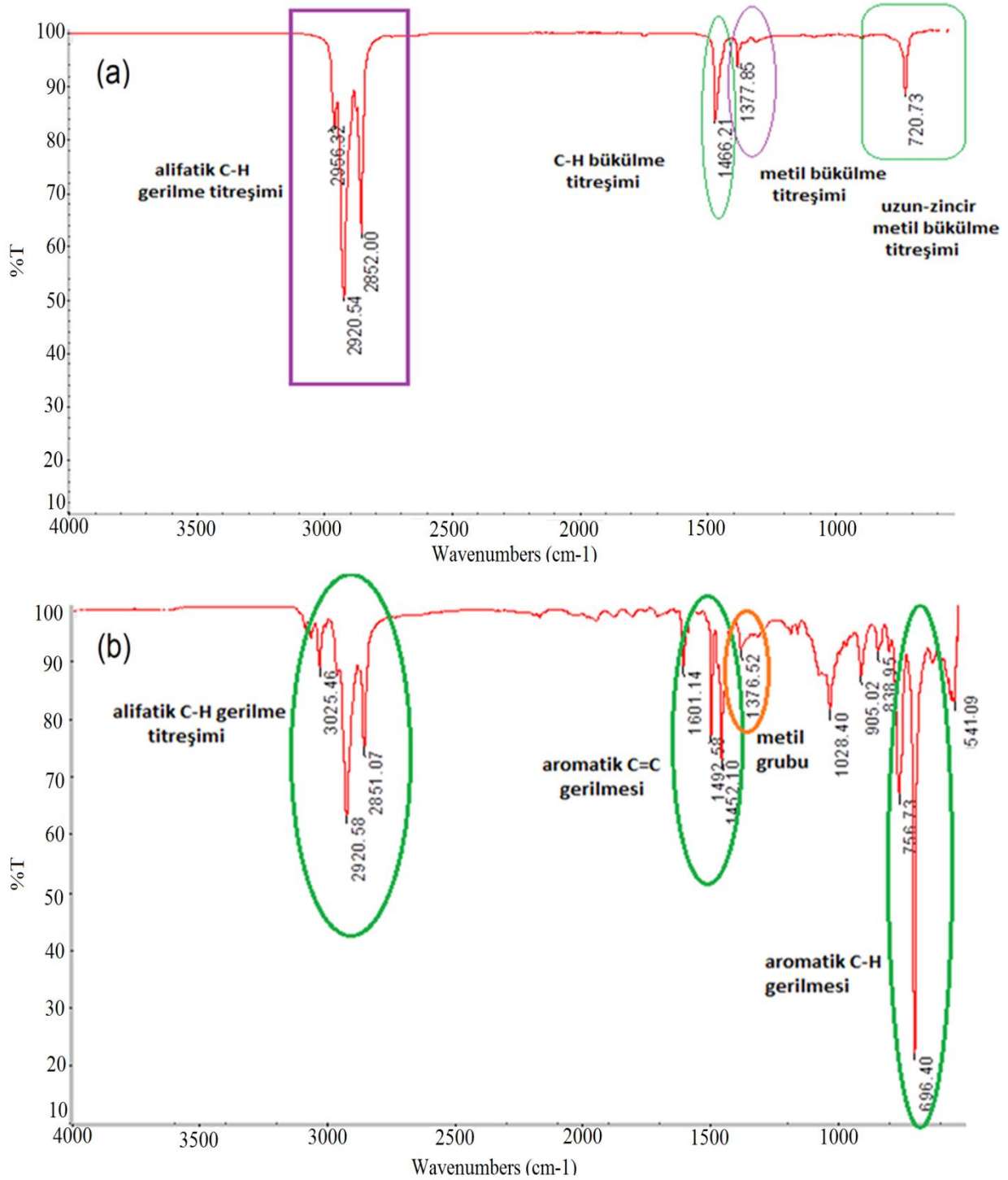
### 3.2 Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerin (MKFDMlerin) Kimyasal Karakterizasyonu (Chemical Characterization of Microencapsulated Phase Change Materials)

Mikrokapsüllenmiş kompozit FDM (MKFDM-%3.0 m-MMT) ve HD'ye ait FT-IR spektrumları Şekil 4'de sunulmuştur. HD'ye ait spektrumda (Şekil 4a) 2956, 2920 ve 2852  $\text{cm}^{-1}$  de ortaya çıkan pikler alifatik C-H gerilme titreşimlerinden ileri gelmektedir. 1466  $\text{cm}^{-1}$ , 1377  $\text{cm}^{-1}$  ve 720  $\text{cm}^{-1}$ deki pikler ise sırasıyla C-H bükülme titreşimi, metil bükülme titreşimi ve uzun-zincir metil bükülme titreşiminden kaynaklanmaktadır. Buna karşın MKFDM-%3.0 m-MMT kompozitine ait spektrumda (Şekil 4b) 3025  $\text{cm}^{-1}$ , 2920  $\text{cm}^{-1}$  ve 2851  $\text{cm}^{-1}$  de görülen pikler çekirdekte yer alan HD'ye ait alifatik C-H gerilme titreşimlerinden ileri gelmektedir. 1601-1452  $\text{cm}^{-1}$  ve 756-696  $\text{cm}^{-1}$  bandında görülen pikler ise kompozit malzemenin poli(St-ko-DVB) yapısındaki kabuğuna ait karakteristik pikler olup sırasıyla aromatik C=C ve aromatik C-H gerilmelerinden ileri gelmektedir. 1376  $\text{cm}^{-1}$  de görülen metil grubuna ait pik ise yine kompozit malzemede yer alan HD varlığını doğrulamaktadır. Tüm bu elde edilen sonuçlar MKFDM-%3.0 m-MMT kompozitinin başarıyla sentezlendiğini doğrulamaktadır.

### 3.3 Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerin (MKFDMlerin) Morfolojisi ve Tanecik Boyut Dağılımı (Morphology and Particle Size Distribution of Microencapsulated Phase Change Materials)

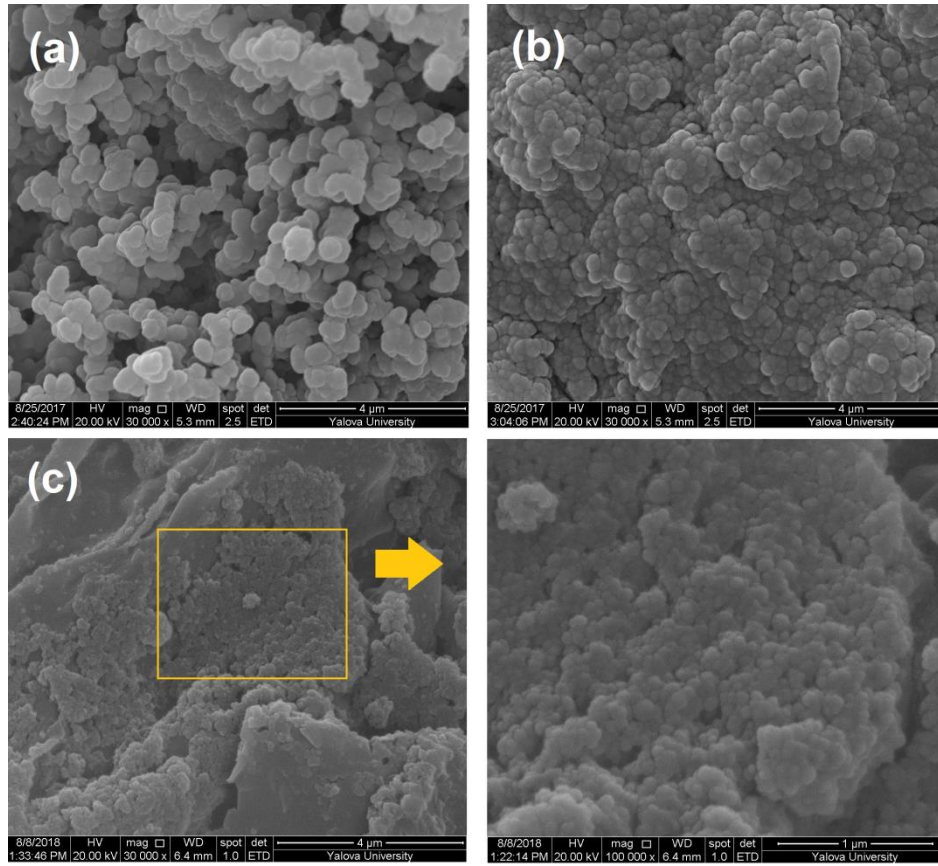
Beyaz toz görünümünde elde edilen MKFDM-%3.0 m-MMT kompozit malzemesinin, MKFDM'nin ve boş poli(St-ko-DVB) kabuk malzemenin tanecik büyüklüğünün ve boyut dağılım aralığının tespit edilmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri elde edilmiş ve bu görüntüler Şekil 5'te sunulmuştur.



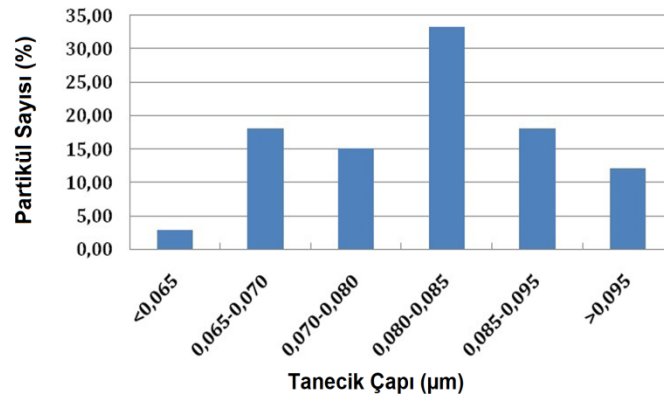


**Şekil 4.** HD(a) ve MKFDM-%3.0 m-MMT kompozit malzemenin (b) FT-IR spektrumları (FT-IR spectra of (a) HD and (b) MKFDM- 3.0% m-MMT composite material)

Şekil 5'den görüldüğü gibi mikrokapsüller neredeyse pürüzsüz ve küresel formda elde edilmiştir. SEM görüntülerinden elde edilen verilerden yapılan hesaplama sonucunda mikrokapsüllere ait ortalama tanecik çap değerleri Tablo 4'de verilmiştir. Yapılan hesaplama sonucunda poli(St-ko-DVB) kabuk malzemenin ortalama tanecik çapı  $0,427 \pm 0,055 \mu\text{m}$  bulunurken, HD içeren MKFDM ve MKFDM-%3.0 m-MMT kompozit malzemesinin ortalama tanecik çapları sırasıyla  $0,229 \pm 0,036 \mu\text{m}$  ve  $0,082 \pm 0,012 \mu\text{m}$  olarak bulunmuştur. Görüldüğü üzere  $1 \mu\text{m}$ 'nin altında elde edilen tanecik boyutları malzemelerin aynı zamanda nano boyutta olduğunu da göstermektedir. Bundan başka, MKFDM-%3.0 m-MMT kompozitinin  $0,065 \mu\text{m}$  ile  $0,095 \mu\text{m}$  arasında değişen düzgün ve dar bir tanecik boyut dağılımına sahip olduğu da görülmektedir (Şekil 6).



Şekil 5. (a) Poli(St-co-DVB) boş kabuk malzemenin, (b) Mikrokapsülenmiş FDM'nin (MKFDM), (c) MKFDM-%3.0 m-MMT kompozitinin SEM görüntüleri (SEM images of (a) Poly (St-co-DVB) hollow shell material, (b) Microencapsulated FDM (MKFDM), (c) MKFDM-3.0% m-MMT composite)



Şekil 6. MKFDM-%3.0 m-MMT kompozitinin tanecik boyut dağılımı grafiği (Particle size distribution chart of MKFDM- 3.0% m-MMT composite)

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

Bu çalışmada organik esaslı faz değiştiren maddeler sınıfında yer alan n-hekzadekan (HD) yüzeyi modifiye edilmiş montmorillonit (m-MMT) kili varlığında faz inversiyon emülsifikasyonu yöntemiyle poli(St-ko-DVB) kopolimer kabuk içerisinde mikro boyutta kapsülenmiştir. %0,5 ila %3 arasında değişen oranlarda m-MMT dolgusu içeren kompozitlerin faz değişim sıcaklıkları ve ısıl enerji depolama kapasiteleri DSC analiziyle ortaya koyulmuştur. Yapılan analizler sonucunda poli(St-ko-DVB) kabuğun varlığı dolayısıyla ve dolgu miktarı arttıkça sentezlenen mikrokapsüllerin  $\Delta H_{erime}$  ve  $\Delta H_{kristallenme}$  değerlerinin azaldığı saptanmıştır. Elde edilen kompozit malzemeler içinde MKFDM-%3.0 m-MMT'nin sahip olduğu faz değişim sıcaklıkları (10,87-21,19°C) ve ısıl enerji depolama kapasitesiyle ( $\Delta H_e=53,41J/g$ ) düşük sıcaklıklı ısıl enerji depolama uygulamaları için uygun bir aday olduğu belirlenmiştir. Bu kompozitin ısıl kararlılığını saptamak için gerçekleştirilen TGA analizi sonucunda kompozit malzemenin dolgu içermeyen MKFDM'ye kıyasla ısıl bozunma başlangıç sıcaklığında yaklaşık 38°C'lik bir artış olduğu gözlenmiş ve buna bağlı olarak da ısıl kararlılığında iyileşme sağlanmıştır. Bununla birlikte, MKFDM-%3.0

m-MMT kompozitinin taneciklerinin küresel biçimde olduğu ve homojen bir boyut dağılımı sergilediği bulunmuştur. Ayrıca elde edilen kompozit kürelerinin ortalama tanecik çapının  $0,082 \pm 0,012 \mu\text{m}$  olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra, m-MMT içeren MKFDM'nin tanecik boyutunun dolgu içermeyen kapsüllerinkinden daha düşük olduğu bulunmuştur. Elde edilen kapsülün boyutunun  $1 \mu\text{m}$ 'nin altında olması bu malzemenin nano boyuttaki malzemeler sınıfında değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak elde edilen kompozit malzemenin, sahip olduğu ısı depolama kapasitesi, faz geçiş sıcaklıkları, yüksek ısı kararlılığı ve uygun tanecik boyutları ile düşük sıcaklıktaki ( $18-30^\circ\text{C}$ ) ısıtma ve soğutma sistemlerinde enerji depolanması amacıyla kullanılabilirliği düşünülmektedir.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

### Kaynaklar (References)

- Alay, S., Göde, F., Alkan, C., 2009. Isıl Enerji Depolama için Poli(etil akrilat)/Hekzadekan Mikrokapüllerinin Üretilmesi ve Karakterizasyonu. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3 (3), 33-46.
- Alexandre, M., Dubois, P., 2000. Polymer-Layered Silicate Nanocomposites: Preparation, Properties And Uses Of New Class of Materials. *Materials Science and Engineering*, 28, 1-63.
- Alic, B., Sebenik, U., Krajnc, M., 2012. Microencapsulation of Butyl Stearate with Melamine-Formaldehyde Resin: Effect of Decreasing the pH Value on the Composition and Thermal Stability of Microcapsules. *Express Polymer Letters*, 6, 826-836.
- Alkan, C., Sarı, A., Karaipekli, A., Uzun, O., 2009. Preparation, Characterization, and Thermal Properties of Microencapsulated Phase Change Material For Thermal Energy Storage. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93, 143-147.
- Alkan, C., Sarı, A., Karaipekli, A., 2011. Preparation, Thermal Properties and Thermal Reliability of Microencapsulated N-Eicosane as Novel Phase Change Material For Thermal Energy Storage. *Energy Conversion and Management*, 52, 687-692.
- Borreguero, A.M., Carmona, M., Luz, M., Sanchez, L., Valverde, J.L., Rodriguez, J.F., 2010. Improvement of the Thermal Behaviour of Gypsum Blocks By the Incorporation of Microcapsules Containing PCMs Obtained By Suspension Polymerization with an Optimal Core/Coating Mass Ratio. *Applied Thermal Engineering*, 30, 1164-1169.
- Chen C., Liu X., Liu W., Ma M., 2014. A Comparative Study of Myristic Acid/Bentonite and Myristic Acid/Eudragit L100 Form Stable Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 127,14-20.
- Chen M., Zheng S., Wu S., Xu G., 2010. Melting Intercalation Method to Prepare Lauric Acid/Organophilic Montmorillonite Shape-Stabilized Phase Change Material. *Journal of Wuhan University of Technology-Material Science and Edition*, 25, 674-677.
- Gao G. B., Qian C. X., Gao M. J., 2010. Preparation and Characterization of Hexadecane Microcapsule with Polyurea-Melamine Formaldehyde Resin Shell Materials. *Chinese Chemical Letters*, 21, 533-537.
- Gondora W., Doudin K., Nowakowski D. J., Xiao B., Ding Y., Bridgwater T., Yuan Q., 2016. Encapsulation of Phase Change Materials Using Rice-Husk-Char. *Applied Energy*, 182, 274-281.
- Fan, L.W., Fang, X., Wang, X., Zeng, Y., Xiao, Y.Q., Yu, Z.T., Xu, X., Hu, Y.C., 2013. Effects of Various Carbon Nanofillers on the Thermal Conductivity and Energy Storage Properties of Paraffin-Based Nanocomposite Phase Change Materials. *Applied Energy*, 110, 163-172.
- Fang, G., Li, H., Chen, Z., Liu, X., 2010. Preparation and Characterization of Flame Retardant N-Hexadecane/Silicon Dioxide Composites as Thermal Energy Storage Materials. *Journal of Hazardous Materials* 181, 1004-1009.
- Feng, L., Zheng, J., Yang, H., Guo, Y., Li, W., Li, X., 2011. Preparation and Characterization of Polyethylene Glycol/Active Carbon Composites as Shape-Stabilized Phase Change Materials. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95, 644-650.
- Hawladar, M.N.A., Uddin, M.S., Khin, M.M., 2003. Microencapsulated PCM Thermal Energy Storage System. *Applied Energy*, 74, 195-202.
- Jeong S-G, Jin Chang S., We S., Kim S., 2015. Energy Efficient Thermal Storage Montmorillonite with Phase Change Material Containing Exfoliated Graphite Nanoplatelets. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 139, 65-70.
- Khadiran, T., Hussein, M.Z., Zainal, Z., Rusli, R., 2015. Shape-stabilised N-Octadecane/Activated Carbon Nanocomposite Phase Change Material for Thermal Energy Storage. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 55, 189-197.
- Kim, S., Chang, S.J., Chung, O., Jeong, S. G., Kim, S., 2014. Thermal Characteristics of Mortar Containing Hexadecane/XGNP SSPCM and Energy Storage Behaviors of Envelopes Integrated with Enhanced Heat Storage Composites for Energy Efficient Buildings. *Energy and Buildings*, 70, 472-479.
- Konuklu, Y., Paksoy, H.O., Ünal, M., 2015. Nanoencapsulation of N-Alkanes with Poly (Styrene-Co-Ethylacrylate) Shells for Thermal Energy Storage. *Applied Energy*, 150, 335-340.
- Konuklu, Y., Paksoy, H.Ö., 2017. Polystyrene Based Caprylic Acid Microencapsulation for Thermal Energy Storage. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 159, 235-242.
- Lashgari S., Arabi H., Mahdavian A. R., Ambrogi V., 2017. Thermal and Morphological Studies on Novel PCM Microcapsules Containing N-Hexadecane as the Core in a Flexible Shell. *Applied Energy*, 190, 612-622.
- Lee, S.H., Yoon, S.J., Kim, Y.G., Choi, Y.C., Kim, J.H., Lee, J.G., 2007. Development of Building Materials by Using Micro-Encapsulated Phase Change Material. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 24, 332-335.
- Li, M., Wu, Z., 2013. Thermal Properties of the Graphite/N-Docosane Composite PCM. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 111, 77-83.

- Li, M., Guo, Q., Nutt, S., 2017. Carbon Nanotube/Paraffin/Montmorillonite Composite Phase Change Material for Thermal Energy Storage. *Solar Energy*, 146, 1-7.
- Liu, L., Su, D., Tang, Y., Fang, G., 2016. Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Materials For Thermal Energy Storage: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62, 305–317.
- Lv, P., Liu, C., Rao, Z., 2017. Review on Clay Mineral-Based Form-Stable Phase Change Materials: Preparation, Characterization And Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68, 707–726.
- Ma, S., Song, G., Li, W., Fan, P., Tang, G., 2010. UV Irradiation-Initiated MMA Polymerization to Prepare Microcapsules Containing Phase Change Paraffin. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94, 1643-1647.
- Mert, M.S., Sert, M., Mert, H.H., 2018. Isıl Enerji Depolama Sistemleri İçin Organik Faz Değiştiren Maddelerin Mevcut Durumu Üzerine Bir İnceleme. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 161-174.
- Mert, M.S., Mert, H.H., Sert, M., 2019a. Microencapsulated Oleic–Capric Acid/Hexadecane Mixture As Phase Change Material For Thermal Energy Storage. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 136, 1551-1561.
- Mert, M.S., Mert, H.H., Sert, M., 2019b. Investigation of Thermal Energy Storage Properties of A Microencapsulated Phase Change Material Using Response Surface Experimental Design Methodology. *Applied Thermal Engineering*, 149, 401-413.
- Özonur, Y., Mazman, M., Paksoy, H. Ö, Evliya, H., 2006. Microencapsulation of Coco Fatty Acid Mixture for Thermal Energy Storage with Phase Change Material. *International Journal of Energy Research*, 30(10), 741-749.
- Peng K., Fu L., Li X., Ouyanga J., Yang H., 2017. Stearic Acid Modified Montmorillonite as Emerging Microcapsules for Thermal Energy Storage. *Applied Clay Science*, 138,100–106.
- Sami S., Etesami N., 2017. Thermal Characterization of Obtained Microencapsulated Paraffin Under Optimal Conditions for Thermal Energy Storage. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 130,1961–1971.
- Sanchez L., Rodriguez, J.F., Romero, A., Borreguero, A.M., Carmona, M., Sanche, P., 2010. Microencapsulation of PCM with a Styrene-Methyl Methacrylate Copolymer Shell By Suspension-Like Polymerization. *Chemical Engineering Journal*, 157, 216-222.
- Sanchez, L., Sanchez, P., Lucas, A.D., Carmona, M., Rodriguez, J.F., 2007. Microencapsulation of PCMs with a Polystyrene Shell. *Colloid and Polymer Science*, 285 (12), 1377-1385.
- Sanchez, L., Rodriguez, J.F., Carmona, M., Romero, A., Sanchez, P., 2011. Thermal and Morphological Stability of Polystyrene Microcapsules Containing Phase-Change Materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 120, 291-297.
- Sarı, A., Alkan, C., Karaipekli, A., Uzun, O., 2009. Microencapsulated N-Octacosane as Phase Change Material For Thermal Energy Storage. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 83(10), 1757-1763.
- Sarı, A., Alkan, C., Karaipekli, A., 2010. Preparation, Characterization and Thermal Properties Of PMMA/N-Heptadecane Microcapsules as Novel Solid-Liquid Micropcm for Thermal Energy Storage. *Applied Energy*, 87, 1529-1534.
- Sarı, A., Alkan, C., Altıntaş, A., 2014a. Preparation, Characterization and Latent Heat Thermal Energy Storage Properties of Micro-Nanoencapsulated Fatty Acids By Polystyrene Shell. *Applied Thermal Engineering*, 73, 1160-1168.
- Sarı, A., Alkan, C., Doğüşücü, D.K., Biçer, A., 2014b. Micro/nano-encapsulated N-Heptadecane with Polystyrene Shell for Latent Heat Thermal Energy Storage. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 126, 42-50.
- Sarı A., Alkan C., Biçer A., Bilgin C., 2014c. Latent Heat Energy Storage Characteristics of Building Composites Of Bentonite Clay And Pumice Sand With Different Organic PCMS. *International Journal of Energy Research*, 38, 1478–1491.
- Sarıer N., Onder E., 2007. Thermal Characteristics of Polyurethane Foams Incorporated with Phase Change Materials. *Thermochimica Acta*, 454, 90-98.
- Park, S.J., Kim, K.S., Hong, S.K., 2005. Preparation and Thermal Properties of Polystyrene Nanoparticles Containing Phase Change Materials as Thermal Storage Medium. *Polymer Korea*, 29(1),8-13.
- Wang Y., Zheng H., Feng H.X., Zhang D.Y., 2012. Effect of Preparation Methods on the Structure and Thermal Properties of Stearic Acid/Activated Montmorillonite Phase Change Materials. *Energy and Buildings*, 47,467–473.
- Yang, R., Xu, H., Zhang, Y., 2003. Preparation, Physical Property and Thermal Physical Property of Phase Change Microcapsule Slurry and Phase Change Emulsion. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 80(4),405-416.
- Zhao, C.Y., Wu, Z.G., 2011. Heat Transfer Enhancement of High Temperature Thermal Energy Storage Using Metal Foams and Expanded Graphite. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95, 636-643.
- Zhao, C.Y., Zhang G.H., 2011. Review on Microencapsulated Phase Change Materials (MEPCMS):Fabrication, Characterization and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3813-3832.
- Zhou, D., Zhao, C.Y., 2011. Experimental Investigations on Heat Transfer in Phase Change Materials (PCM)s Embedded İn Porous Materials. *Applied Thermal Engineering*, 31, 970-977.



## EŞ KANALLI AÇISAL PRESLEME (EKAP) UYGULANAN GEMİ İNŞA ÇELİĞİNİN İÇYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Dursun Murat SEKBAN\*

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği,  
Trabzon, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Eş Kanallı Açısal Presleme,  
Gemi İnşaatı,  
Düşük Karbonlu Çelik,  
İçyapı,  
Mekanik Özellik.*

### Öz

Yüksek mukavemetli çeliklerin düşük kaynak edilebilirlik ve şekillendirilebilmeleri nedeniyle, gemilerde yüksek dayanım istenen kısımlarda düşük-orta mukavemetli çelikler kalınlıkları artırılarak kullanılmaktadır. Daha kalın sacların kullanılması beraberinde ağırlığın ve yakıt tüketiminin önemli ölçüde artmasını getirmektedir. Bu bağlamda düşük-orta mukavemetli gemi imalat çeliklerinin aşırı plastik deformasyon yöntemleri veya ısıl işlemler uygulanarak dayanımlarının geliştirilmesi oldukça önemlidir. Aşırı plastik deformasyon (APD) yöntemleri ile malzemenin kimyasal bileşiminde herhangi bir değişiklik yapmadan tane boyutunu küçülterek malzemenin mukavemetini arttırmak son dönemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. APD yöntemleri arasında eş kanallı açısal presleme (EKAP) yöntemi yüksek oranda tane inceltme ve mukavemet arttırma özelliği bakımından öne çıkmaktadır. Literatür incelendiğinde EKAP yönteminin herhangi bir gemi inşa çeliğine uygulamasının olmadığı açıkça görülmektedir. Bu yüzden yapılan çalışmada gemi inşaatından yoğun bir kullanıma sahip düşük-orta mukavemetli Grade A gemi inşa çeliğine 300 °C'de tek paso EKAP uygulanmış ve EKAP sonrası çelikteki içyapısal ve mekanik özelliklerinin değişimleri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda EKAP sonrası ortalama tane boyutunun 25 µm seviyesinden 7 µm seviyesine indiği ve tane boyutunda meydana gelen bu azalmanın sonucu olarak sertlik ve mukavemet değerlerinin ana yapıya göre önemli oranda arttığı belirlenmiştir. Öte yandan EKAP sonrası numunelere aşınma ve şekil verilebilirlik deneyleri de uygulanmış ve aşınma davranışının bir miktar iyileştiği şekil verilebilirliğin ise EKAP sonrası kötüleştiği belirlenmiştir.

## INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSED (ECAPED) SHIP BUILDING STEEL

### Keywords

*Equal Channel Angular,  
Pressing,  
Shipbuilding,  
Low Carbon Steel,  
Microstructure,  
Mechanical Properties.*

### Abstract

Low-medium strength steels are used by increasing their thickness in parts where high strength is required on ships due to the low weldability and formability of high-strength steels. The use of thicker plates brings about a significant increase in the ship's weight and their fuel consumption as expected. So, it is very important to improve the strength of low-medium strength shipbuilding steels by applying severe plastic deformation methods or heat treatments. Grain refinement via severe plastic deformation (SPD) seems to be an essential strengthening mechanism without changing the chemical composition of metallic materials. Among SPD methods, equal channel angular pressing (ECAP) is one of the most commonly used one due to its high grain refinement capacity. When the literature is examined, it is clearly seen that ECAP is not applied to any shipbuilding steel before. Therefore, in this study, one pass ECAP at 300 °C to low-medium strength shipbuilding steel (Grade A) which has intensively used in the shipbuilding industry and the changes in the microstructural and mechanical properties of steel after ECAP were investigated. After investigations, it was determined that the average grain size after

\* İlgili yazar / Corresponding author: msekban@ktu.edu.tr, +90-462-377-8077

ECAP decreased from 25  $\mu\text{m}$  (base material) to 7  $\mu\text{m}$  and as a result of this, hardness and strength values increased significantly compared to the base material. On the other hand, wear and formability tests were applied after and before ECAP and it was determined that while a slight improvement was obtained in wear behavior, formability behavior deteriorated after ECAP.

#### Alıntı / Cite

Sekban, D.M., (2020). Eş Kanallı Açısal Presleme (EKAP) uygulanan Gemi İnşa Çeliğinin İyçyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 240-251.

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

D.M. Sekban, 0000-0002-7493-1081

#### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	27.05.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	17.08.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	25.10.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Gemilerde ahşap, kompozit malzemeler ve alüminyum alaşımları kullanılsa da bu malzemelerle üretilen gemilerde özellikle dayanım anlamında yaşanan sıkıntılardan ötürü gemi inşaatında çelik malzemelerin kullanımı ön plana çıkmaktadır (Eyres, 2001). Çelikler ayrıca şekil verilebilirlik, kaynak edilebilirlik ve maliyetleri göz önüne alındığında da kullanılan diğer malzemelere büyük üstünlükler sağlamaktadır. Gemilerde kullanılan çelikler en genel anlamda düşük-orta mukavemetli çelikler ve yüksek mukavemetli çelikler olarak ikiye ayrılabilir. Düşük-orta mukavemetli gemi inşa çeliklerinde karbon oranı yaklaşık %0,2 seviyelerindedir. Bu tip çeliklerde dayanımı arttırması nedeniyle Mn ve Si elementleri de bulunmaktadır (Bhadeshia ve Honeycombe 2011; Klepaczko vd., 2009). Yüksek mukavemetli gemi inşa çelikleri ise düşük-orta mukavemetli gemi imalat çeliklerine göre daha yüksek oranda Mn ve Cu elementleri içerdiğinden; daha yüksek mukavemet, sertlik ve korozyon direnci gösterirler. Ayrıca bu tür çelikler düşük-orta mukavemetli gemi imalat çeliklerinde bulunmayan ve yapıya yüksek mukavemet, yüksek sertlik, iyi korozyon dayanımı veren ve tane irileşmesini engelleyici Nb, V, Ti ve N gibi elementleri de ihtiva ederler (Klepaczko vd., 2001). Yüksek mukavemetin istendiği gemi kısımlarında yüksek mukavemetli çelikler kullanılsa da bu tür çeliklerin kullanılmasını zayıf kaynak edilebilirlik ve düşük şekil verilebilirlik gibi kısıtlayan bazı faktörler vardır. Bu faktörler göz önüne alındığında gemilerde yüksek dayanımın istenildiği yerlerde genellikle daha kalın saclar kullanılarak yüksek mukavemet gereksinimi karşılanmaktadır. Yüksek mukavemet elde etmek adına daha kalın sacların kullanılması gemilerde ağırlığın dolayısıyla da yakıt tüketiminin önemli ölçüde artışına neden olmaktadır. Bu nedenle düşük-orta mukavemetli gemi imalat çeliklerinin uygulanacak çeşitli yöntemlerle mukavemetlerinin geliştirilmesi gemi imalat sektörüne önemli bir katkı olacaktır.

Çeşitli aşırı plastik deformasyon (APD) yöntemleri ile malzemenin kimyasal bileşiminde herhangi bir değişiklik yapmadan tane boyutunu küçülterek malzemenin mukavemetini arttırmak son dönemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu APD yöntemleri arasında eş kanallı açısal presleme (EKAP) yöntemi yüksek oranda tane inceltme ve mukavemet arttırma özelliği açısından diğer yöntemler arasında ön plana çıkmaktadır. EKAP yöntemi eş kesit alanına sahip iki kanaldan düşey kanala yerleştirilen numunenin hidrolik bir pres yardımıyla itilerek yatay kanaldan çıkarılması prensibine dayanmaktadır (Demirtaş, 2017). Bu işlem sırasında numunede yatay kanaldan düşey kanala geçiş sırasında kayma düzleminde gerçekleşen basit kayma ile yoğun bir plastik deformasyon gerçekleşmektedir. EKAP yöntemi ile ilgili daha detaylı bilgiye literatürdeki çalışmalardan ulaşılabilmektedir (Valiev vd., 2000; Furukawa vd., 2001; Valiev ve Langdon 2006; Langdon, 2007). EKAP yöntemi kullanılarak malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların yoğunlukla çinko, alüminyum ve bakır gibi hafif alaşımlar üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Demirtaş ve arkadaşları yaptıkları farklı çalışmalarda değişen oranlardaki Zn-Al alaşımlarına EKAP uygulamış ve EKAP sonrasında tane boyutunun oldukça incelendiğini ve malzemenin süperplastik özellik göstermeye başladığını belirlemişlerdir (Demirtaş vd., 2015; Demirtaş vd., 2018). Ebrahimi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Cu-Sn alaşımının EKAP sonrasında tane boyutunun mikron altı seviyelere düştüğünü, bununla birlikte korozyon dayanımının da arttığını belirlemişlerdir (Ebrahimi vd., 2019). Smirnov ve Konstantinov saf bakıra EKAP uygulamış ve EKAP sonrasında malzemenin ultra ince taneli bir içyapı sergilediğini, mukavemet ve darbe dayanımı değerlerinin de yükseldiğini rapor etmişlerdir (Smirnov ve Konstantinov 2018). Horikiri ve arkadaşları yaptığı çalışmada ise AA7075 alaşımına değişen paso sayılarında EKAP uygulamış ve artan paso sayısı ile çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin arttığını belirlemişlerdir (Horikiri vd., 2017). Suresh ve arkadaşları Al-Cu-Li alaşımı olan AA2195'e 4 paso EKAP uygulanması sonrasında malzemenin tane boyutunun oldukça incelendiğini, sertlik ve mukavemet değerlerinin önemli oranda artarken uzama değerlerinde ufak bir azalma olduğunu raporlamışlardır (Suresh vd., 2019). Shaeri ve arkadaşları ise AA7075 alaşımında EKAP'ın yaşlanma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmış ve ana yapının 60  $\mu\text{m}$  olan ortalama tane boyutunun 200–350nm seviyelerine kadar indiğini, öte yandan tüm yaşlandırma koşullarında ana yapıya göre daha yüksek dayanım değerleri elde edildiğini belirlemişlerdir (Shaeri vd., 2015). Bu tür hafif alaşımların dışında çelik ve titanyum gibi daha mukavim



malzemelerin de EKAP yöntemiyle başarıyla proses edilebildiği de literatürde görülmektedir. Maier ve arkadaşları yaptıkları çalışmada % 0.09 C içeren düşük karbonlu bir çeliğe EKAP uygulamış ve EKAP sonrasında farklı sıcaklıklardaki ısıl işlemin içyapı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan incelemeler sonucunda EKAP sonrası tane boyutunun önemli oranda azaldığı, 500 °C'nin altındaki ısıl işlemlerde içyapı önemli oranda etkilenmezken, bu sıcaklığın üstüne çıkıldıkça tane irileşmesinin artarak meydana geldiği belirlenmiştir (Maier vd., 2013). Dobatkin ve arkadaşları östenitik paslanmaz çeliğe oda sıcaklığı ve 400 °C'de EKAP işlemi uygulamışlar ve her iki sıcaklıkta da mikron altı seviyelerde ortalama tane boyutları elde ettiklerini ve mukavemet değerlerinin önemli oranda arttığını belirtmişlerdir (Dobatkin vd., 2018). Islamgaliev ve arkadaşları yüksek kromlu ferritik martenzitik çeliğine (12Cr-2W-2Ni-0.5Mo) EKAP uygulamışlar ve işlem sonrasında tane inceliği elde ettiklerini ve mekanik özelliklerin geliştiğini belirtmişlerdir (Islamgaliev vd., 2019). Yanxia ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada ise saf titanyum alaşımına EKAP işlemi uygulamışlar ve EKAP sonrasında tane boyutundaki incelenin mekanik özellikler üzerinde geliştirici etkisini ortaya koymuşlardır. Öte yandan bu çalışmada EKAP sonrasında ultra ince taneli hale dönüşen saf titanyumun korozyon dayanımı konusunda ana duruma göre karışık sonuçlar elde edildiği ve bu konu üzerinde farklı çalışmalarında ortaya konması gerektiği bildirilmiştir (Yanxia vd., 2017). Li ve arkadaşları Grade 4 titanyum alaşımına 300 °C'de 8 paso EKAP işlemi uygulamış ve işlem sonrasında 200 nm seviyelerinde tanelerden oluşan bir içyapı ve ana yapıya göre oldukça yüksek mukavemet değerleri elde ettiklerini rapor etmişlerdir (Li vd., 2014).

Yapılan bilimsel ve teknolojik incelemeler gemi imalatında kullanılan çeliklerin özellikle kimyasal yapısını etkilemeden mekanik özelliklerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaların oldukça kısıtlı olduğunu göstermektedir. Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde ise çalışmaların daha çok malzemelerin ısıl işlem sonrası mekanik özelliklerinin değişimine ya da sürtünme karıştırma işlemi (SKİ) sonrası malzemelerdeki mekanik özelliklerin değişimi üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Hayat ve Uzun yaptıkları çalışmada düşük karbonlu gemi inşaatı çeliğini farklı sıcaklıklarda tavlarken su vermişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda tavlama sıcaklığı arttıkça su verme işlemi sonrasında oluşan martenzit oranının arttığı, dayanım değerlerinin yükseldiği, darbe dayanımı değerlerinin ise azaldığını belirlemişlerdir (Hayat ve Uzun 2011). Sekban ve arkadaşları yaptıkları farklı çalışmalarda ise yine düşük karbonlu gemi inşa çeliğine sürtünme karıştırma işlemi (SKİ) uygulamışlar ve işlem sonrasında çeliğin ortalama tane boyutunun önemli oranda azaldığını, dayanım, sertlik, darbe dayanımı ve şekil verilebilirlik özelliklerinin de iyileştiğini bildirmişlerdir (Sekban vd., 2016; Sekban vd., 2018). EKAP yönteminin gemi inşaatı özelinde kullanımını incelendiğinde ise literatürde henüz bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu bağlamda bu çalışma da farklı çelik türlerine başarıyla uygulanan EKAP yöntemi gemi inşaatında yoğun bir kullanım alanına sahip düşük-orta mukavemetli (ASTM 131A) gemi inşa çeliğine EKAP yöntemi uygulanmış ve EKAP sonrası çeliğin içyapısal ve sertlik, mukavemet, aşınma ve şekil verilebilirlik gibi gemiler için önem teşkil eden mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

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

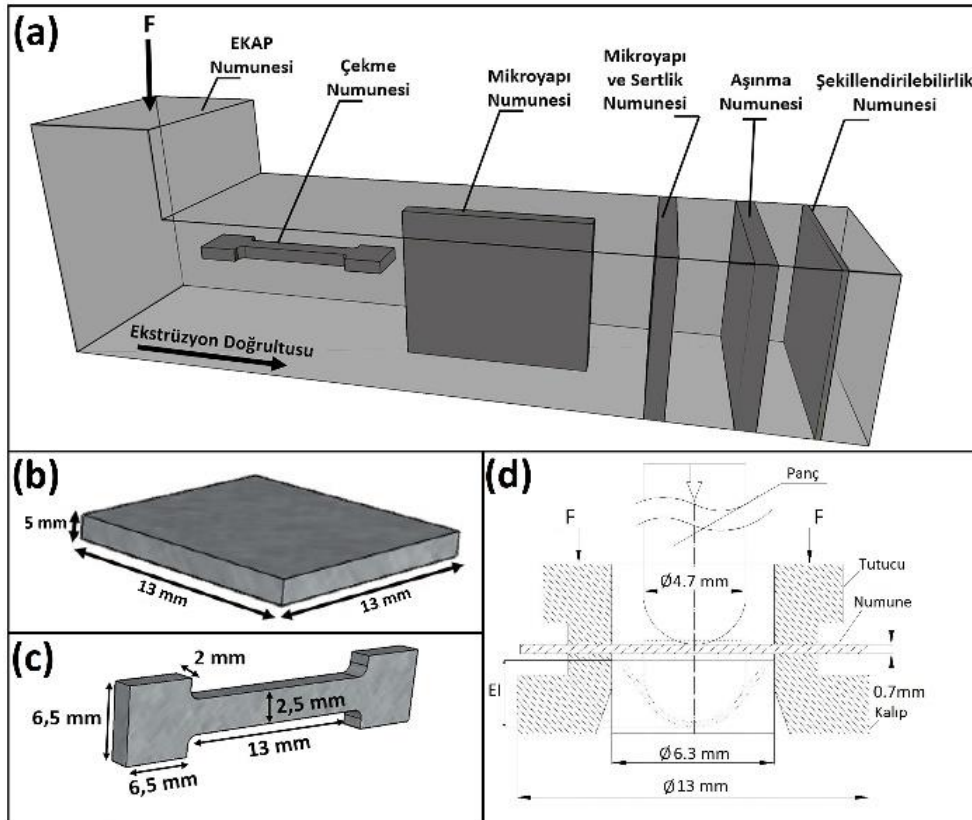
Çalışmada gemi inşaatından yoğun bir kullanıma sahip, sıcak hadde ürünü düşük-orta mukavemetli ASTM 131A (0.16 ağırlık % C, 0.18 ağırlık % Si, 0.7 ağırlık % Mn, 0.011 ağırlık % S, 0.018 ağırlık % P, 0.09 ağırlık % Cr, 0.14 ağırlık % Mo, 0.04 ağırlık % Cu, 0.04 ağırlık % V ve kalan Fe) çeliği kullanılmıştır. EKAP işlemleri 13 X 13 mm<sup>2</sup> kesit alanı ve 130 mm uzunluğa sahip numunelere 300 °C'de 90° iç açığa ( $\Phi$ ) ve 0° dış yay açısına ( $\Psi$ ) sahip kalıpta 1 mm/s basma hızında tek paso olarak gerçekleştirilmiştir. EKAP sırasında numunenin yüzeyi, kalıp ile arasındaki sürtünmeyi azaltmak amacıyla molibden sülfat katı yağlayıcı ile yağlanmıştır.

EKAP öncesi ve sonrası numunelerin içyapısal değişimlerini incelemek adına içyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. EKAP sonrası numuneler elektro-erozyon yöntemi kullanılarak olası yönlenmeleri gözleyebilmek adına Şekil 1'de gösterildiği gibi ekstrüzyon doğrultusunda ve ekstrüzyon doğrultusuna dik olarak 2 farklı yönde çıkarılmıştır. EKAP öncesi ve sonrası içyapı incelemeleri için optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskop (SEM) kullanılmıştır. Optik mikroskop incelemeleri için numuneler farklı numaralarda zımparalarla zımparalandıktan sonra 1 µm boyutunda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılarak parlatılmış ve ardından %3 Nital çözeltilisinde (%3 HNO<sub>3</sub> + %97 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) 15 s bekletilerek dağlanmış. SEM incelemeleri için numuneler OM inceleme numuneleriyle benzer şekilde hazırlanarak JEOL 6400 marka SEM görüntüleme cihazında, 15 keV ve ikincil görüntüleme modu (SE) kullanılarak incelenmiştir.

EKAP öncesi ve sonrası numunelerdeki mekanik özellik değişimlerini belirlemek amacıyla sertlik, çekme, aşınma ve şekil verilebilirlik (Erichsen) deneyleri uygulanmıştır. Deneyler için numuneler, EKAP sonrası iş parçasından Şekil 1'de gösterilen konumlarda ve boyutlarda elektro-erozyon yöntemi kullanılarak çıkarılmıştır. Sertlik deneyleri Vickers sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak Struers marka (Duramin 3) mikro-sertlik deney cihazında batıcı ucun basma yükü 300 g ve yük altında bekleme süresi 10 s seçilerek gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi numuneleri standart çekme numunesi boyutlarının EKAP sonrası elde edilen parçaya göre büyük gelmesinden ötürü standart dışı olarak köpek kemiği şeklinde (dog-bone shaped) ve 2 mm x 3 mm x 26 mm boyutlarında



çıkarılmıştır. Deneyler Instron 3382 model bir üniversal çekme-basma deney cihazı kullanılarak oda sıcaklığında  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  lik deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri 13 mm x 13 mm x 5 mm boyutlarında kesilen numuneler ile UTS Tribometer T30M-HT model aşınma test cihazında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde resprokeyting (iler-geri) hareketli aşınma deney tipi ve 6 mm çapında  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aşındırıcı bilyeler kullanılmıştır. Ayrıca deneyler 0.1 m/s kayma hızında, 10 N yüklemeye değerinde ve 200 m kayma mesafesi seçilerek gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonrası aşınma izlerinin 3 boyutlu tarama grafikleri Nanofocus µscan marka optik profilometre ile çıkarılmıştır. EKAP sonrası numunelerin şekil verilebilirlik davranışındaki değişimleri belirlemek için ana malzeme ve EKAP sonrası numunelere Erichsen şekil verilebilirlik deneyleri uygulanmıştır. Numuneler 13 mm'lik kare formda ve 0.7 mm kalınlığında kesilerek Instron 3382 model çekme-basma deney cihazına bağlanan minyatürize kalıp kullanılarak teste tabi tutulmuşlardır. Numunelerin yüzeyleri testler öncesinde zımparalanıp parlatılarak çizikler gibi çatlak başlangıcı oluşturabilecek yüzey kusurları giderilmiş ve 0,045 mm/s zımba ilerleme hızında yağlayıcı kullanılmadan Erichsen testleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası numunelerin yüzeyler SEM kullanılarak incelenmiş ve optik profilometre ile 3 boyutlu tarama görüntüleri çıkarılmıştır. Yapılan tüm mekanik testlerde en az 3'er numune kullanılmış ve saçılım değerleri sonuçlar tablosuna yansıtılmıştır.

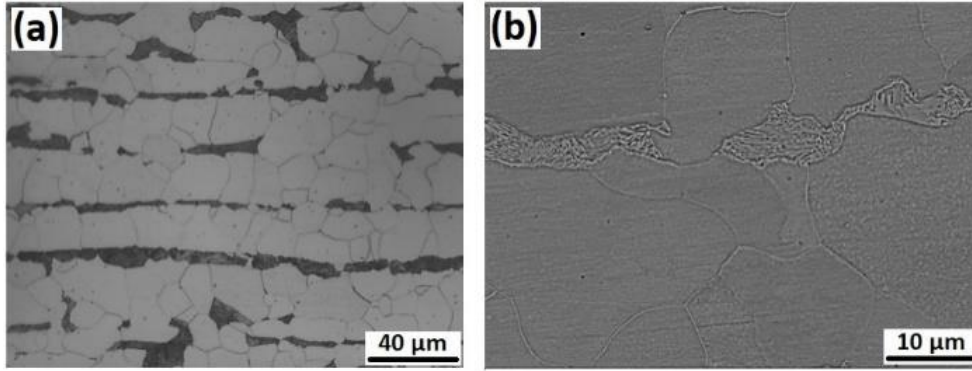


**Şekil 1.** (a) EKAP sonrası çıkarılan inceleme numunelerinin şematik gösterimi. Çıkarılan numunelerin boyutları: (b) içyapı, sertlik ve aşınma numunesi, (c) çekme numunesi ve (d) Erichsen kalıbı ve numunesi. ((a) Schematic illustration of the examination samples taken after EKAP. Dimensions of the extracted samples: (b) microstructure, hardness and wear sample, (c) tensile sample, and (d) Erichsen mold and sample.)

### 3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

#### 3.1. İçyapısal Değişimler ve Malzemeye Uygulanan Deformasyon Miktarı (Microstructural Changes and Amount of Deformation Applied to the Material)

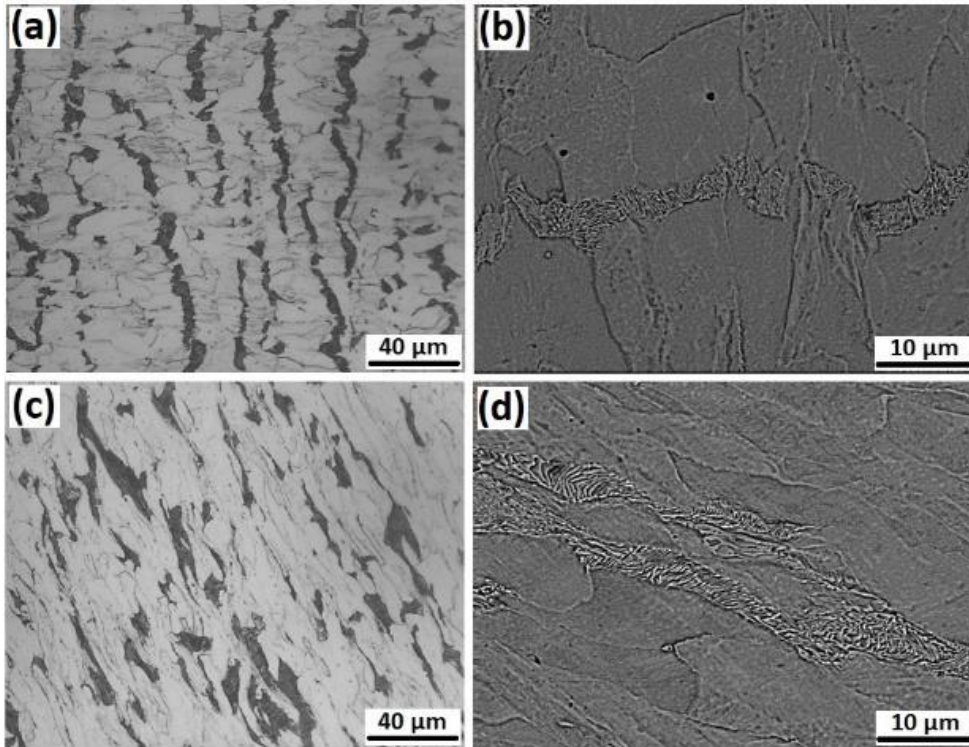
Şekil 2' de çalışmada kullanılan düşük-orta mukavemetli gemi inşa çeliğinin içyapı görüntüleri verilmiştir. Görüleceği üzere EKAP öncesi malzeme içyapısı tipik bir düşük karbonlu alaşımsız çeliğin içyapısını sergilemekte ve açık renkli ferrit ve koyu renkli ince sementit lamelleri içeren perlit fazından meydana gelmektedir. Sıcak hadde ürünü olan malzemede beklenildiği üzere perlit fazı tane sınırları boyunca hadde doğrultusunda yönlendirilmiştir. Başlangıç yapısında içyapının ortalama ferrit tane boyutunun 25 µm olduğu saptanmıştır.



**Şekil 2.** Düşük-orta mukavemetli gemi inşaatı çeliğinin EKAP öncesi içyapı görüntüleri: (a) Optik mikroskop görüntüsü ve (b) SEM görüntüsü. (Microstructure of low-medium strength shipbuilding steel before ECAP: (a) Optical micrograph and (b) SEM micrograph.)

Tek paso EKAP sonrası ekstrüzyon doğrultusuna dik olarak çıkarılan numuneden oluşan içyapıya ait optik ve SEM resimleri Şekil 3 (a-b)'de verilmiştir. Görüleceği üzere EKAP sonrası düşük-orta mukavemetli gemi inşa çeliğinin içyapısı işlem sırasında meydana gelen yoğun plastik deformasyondan önemli ölçüde etkilenerek ana malzemeye göre oldukça incelmış tanelerden oluşmaktadır. İşlem öncesi 25 µm seviyelerinde ölçülen ortalama ferrit tane boyutunun EKAP sonrasında 7 µm seviyesine indiği belirlenmiştir. Öte yandan ekstrüzyon doğrultusuna dik olarak çıkarılan numunelerin büyük oranda eş eksenli tanelerden oluştuğu da içyapı görüntülerinde açıkça görülmektedir.

EKAP sonrası ekstrüzyon doğrultusuna paralel yönde çıkarılan numunelerde oluşan içyapının optik ve SEM görüntüleri Şekil 3 (c-d)'de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi ekstrüzyon doğrultusunda numune oldukça yüksek en boy oranına sahip ve yönlenmiş ferrit ve perlit tanelerinden oluşmaktadır. Literatür incelendiğinde de tek paso EKAP sonrası ekstrüzyon doğrultusunda iç yapının benzer şekilde yönlenmiş tanelerden oluştuğu görülebilmektedir (Iwahashi vd., 1998; Segal, 1999; Gholinia vd., 2000). Oluşan bu yönlenmiş içyapıya tek paso EKAP sırasında numunenin deformasyon düzleminden geçtiği esnada basit kayma ile deformasyona uğraması neden olmaktadır. ECAP kalıbı akış düzlemi üzerinde ekstrüzyon yönü ile  $\sim 45^\circ$ lik bir açığa sahiptir ve bu yüzden taneler kalıbın dikey ve yatay kanallarının kesişimlerindeki teorik kesme düzlemi boyunca uzamaktadırlar.

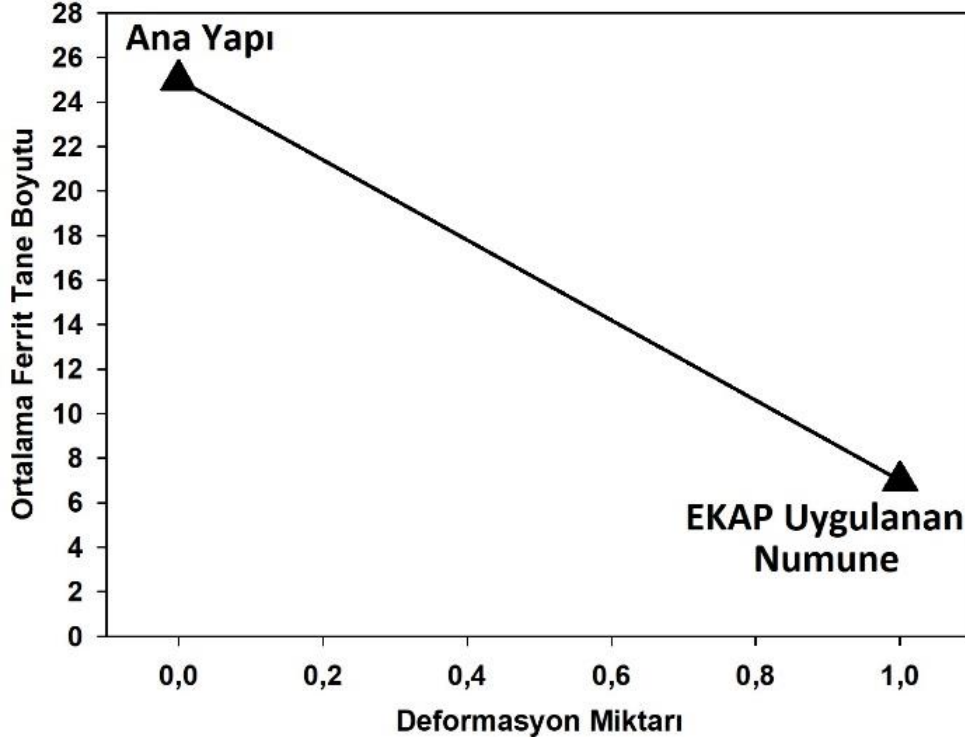


**Şekil 3.** EKAP sonrası düşük-orta mukavemetli gemi inşaatı çeliğinin içyapı görüntüleri: (a-b) Ekstrüzyon doğrultusuna dik olarak çıkarılan optik mikroskop ve SEM görüntüsü ve (c-d) Ekstrüzyon doğrultusunda çıkarılan optik mikroskop ve SEM görüntüsü. (Microstructures of low-medium strength shipbuilding steel after ECAP: (a-b) Optical microscope and SEM micrographs taken perpendicular to the extrusion direction and (c-d) Optical microscope and SEM micrographs taken from extrusion direction.)

Tek paso EKAP sonrası malzemeye uygulanan deformasyon miktarı aşağıdaki formülle hesaplanabilmektedir. Formüldeki ( $\Phi$ ) iç açısına  $0^\circ$  değerini, ( $\psi$ ) dış yay açısı değerini ise  $90^\circ$  değerini girdiğimizde EKAP uyguladığımız kalıp için tek paso sonrasında malzemeye uygulanan deformasyon miktarı yaklaşık 1 olarak elde edilmektedir.

$$\varepsilon = 1/\sqrt{3} [2\cot(\psi/2 + \Phi/2) + \psi \operatorname{cosec}(\psi/2 + \Phi/2)] \quad (1)$$

Değişen deformasyon miktarı ile malzeme tane boyutunda meydana gelen değişim grafiği Şekil 4'de görülmektedir. Görüleceği üzere deformasyon öncesi (0 deformasyon miktarında)  $25 \mu\text{m}$  seviyelerinde ölçülen ortalama ferrit tane boyutu tek paso EKAP sonrasında (yaklaşık 1 olarak ölçülen deformasyon miktarı)  $7 \mu\text{m}$  seviyelerine kadar inmiştir.



Şekil 4. Değişen deformasyon miktarı ile ortalama ferrit tane boyutundaki değişim grafiği. (Graph of change in average ferrite grain size with varying deformation amount.)

### 3.2. Mekanik Özellikler (Mechanical Properties)

#### 3.2.1. Sertlik ve Mukavemet (Hardness and Strength)

Ana yapı ve EKAP sonrası ekstrüzyon doğrultusuna dik olarak çıkarılan numuneler ile yapılan sertlik ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 1'de gösterilmiştir. Ana yapıya ait  $130 \text{ Hv}0.5$  sertlik değeri görüleceği üzere EKAP sırasında oluşan yoğun plastik deformasyonun sonucu olarak incelenen tane boyutu ve artan dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak  $285 \text{ Hv}0.5$  seviyelerine çıkmıştır (İslamgaliev vd., 2019; Levin vd., 2019). Öte yandan EKAP sonrası çıkarılan numunenin tamamında homojen dağılımlı bir içyapı olduğundan numunenin ölçüm yapılan farklı tüm bölgelerinde sertlik değerlerinin  $285 \text{ Hv}0.5$  seviyelerine çıktığı da belirlenmiştir.

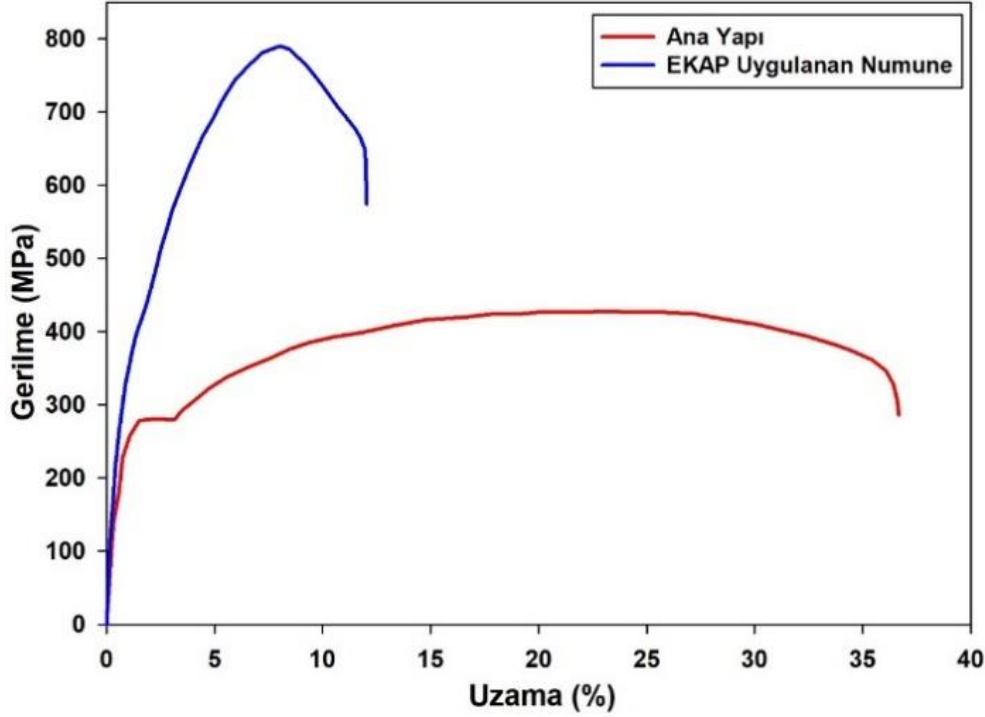
Tablo 1. Ana yapı ve EKAP sonrası numunelerin mikrosertlik değerleri. (Microhardness values of base and ECAPed samples.)

	Ana Yapı	EKAP Uygulanan Numune
Mikrosertlik ( $\text{Hv}0.5$ )	$130 \pm 5$	$285 \pm 11$

Ana yapı ve tek paso EKAP sonrası yapıya ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 5'de ve bu eğrilerden elde edilen temel mekanik özellikler Tablo 2'de verilmiştir. Görüleceği üzere EKAP sonrası malzemenin mukavemet değerlerinde önemli oranda bir artış yaşanmıştır. Ana yapıda  $284 \text{ MPa}$  olan akma dayanımı EKAP sonrası  $414 \text{ MPa}$  seviyesine,  $402 \text{ MPa}$  olan çekme dayanımı ise  $795 \text{ MPa}$  seviyesine yükselmiştir. EKAP sonrası mukavemet değerlerinde elde edilen bu radikal artış temelde tane boyutunda meydana gelen incelmeden kaynaklanmaktadır (Kim vd., 2005; Niendorf vd., 2006; Saray vd., 2011). Öte yandan tane boyutunda meydana gelen radikal olmayan bu incelemeye karşın mukavemet değerlerinde yüksek oranda bir artış yaşandığı açıktır.

Bunun nedeninin ise yeniden kristalleşmenin gerçekleşmediği sıcaklık değerlerinde uygulanan EKAP sırasında malzemede meydana gelen yoğun deformasyonun sonucu oluşması beklenen dislokasyon yoğunluğu artışının olduğu düşünülmektedir.

EKAP sonrası çeliğin uzama değerlerinde ise önemli bir oranda azalmanın olduğu ve ana yapıdaki uniform uzama değerinin %21,1'den %8,7'ye ve kopma uzaması değerinin ise %36,4'den %12,7'ye düştüğü belirlenmiştir. EKAP sonrası uzama değerlerindeki bu düşüşe tane incelmeleri sonucu malzemede tane sınırı oranının artmasının neden olduğu düşünülmektedir (Saray vd., 2011). Öte yandan EKAP sonrası olduğu düşünülen dislokasyon yoğunluğundaki artışın da uzamadaki bu düşüşe etki eden bir diğer faktör olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5. Ana yapı ve EKAP sonrası numunelere ait mühendislik gerilme-uzama eğrileri. (Room temperature engineering stress-strain curves of base and ECAPed samples.)

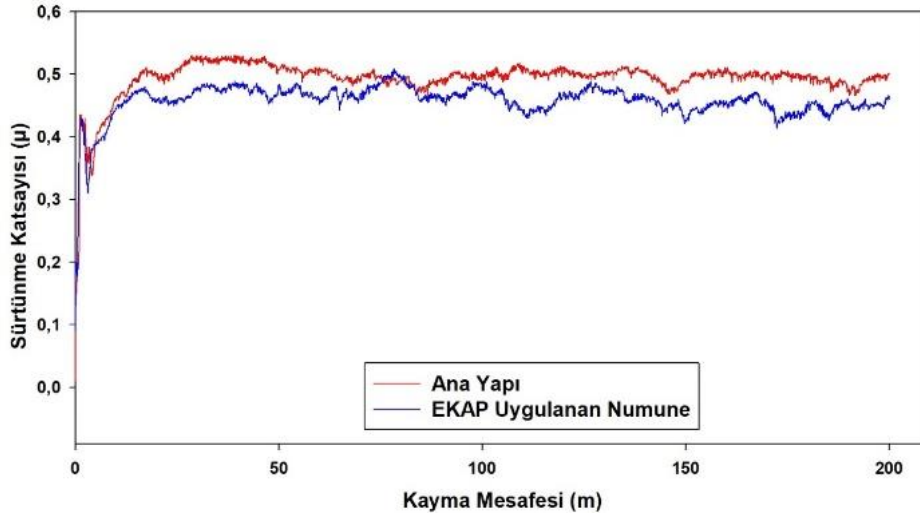
Tablo 2. Ana yapı ve EKAP sonrası numunelere ait temel mukavemet ve uzama değerleri. (Main strength and elongation values of base and ECAPed samples.)

Durum	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (Mpa)	Uniform Uzama (%)	Kopma Uzaması (%)
Ana Yapı	284 ± 08	402 ± 10	21,1 ± 0,9	36,4 ± 2
EKAP	414 ± 07	795 ± 12	8,7 ± 0,7	12,7 ± 1

### 3.2.2. Aşınma (Wear)

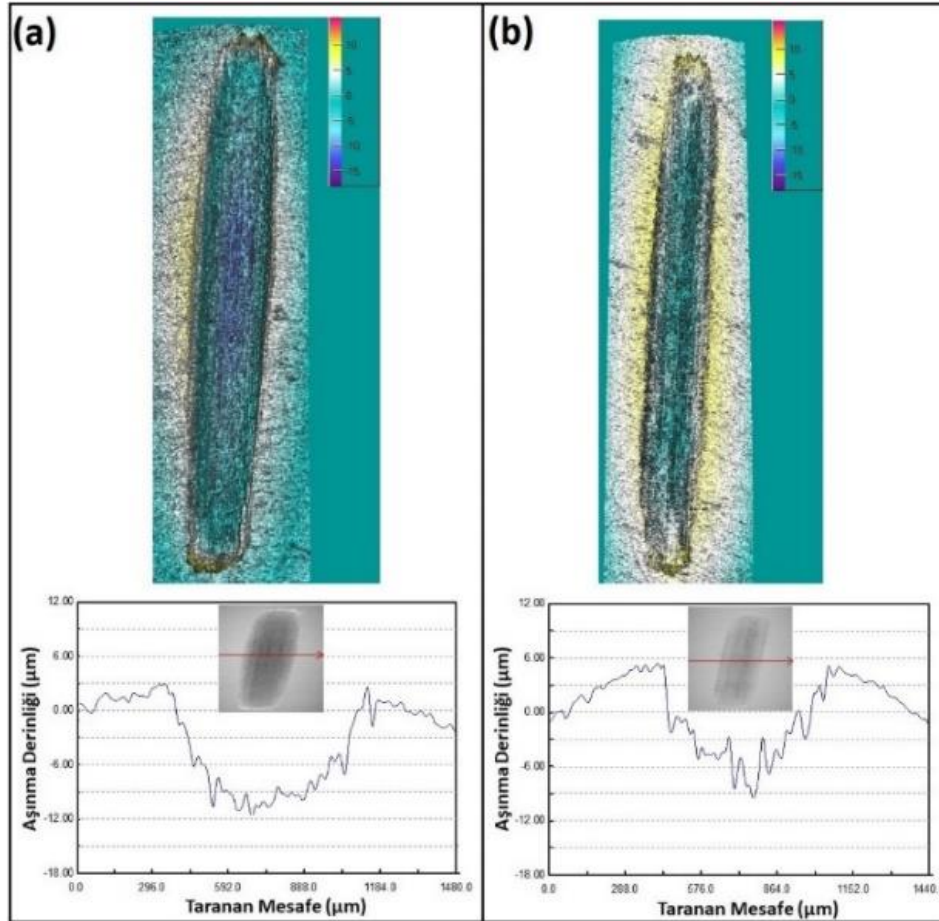
Şekil 6'da ana yapı ve tek paso EKAP sonrası yapıya ait sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimini veren eğriler gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde eğrilerin ilk bölümünde sürtünme katsayısı değerlerinin keskin bir şekilde arttığı, daha sonra ise belli saçılımlarla kararlı bir duruma eriştiği görülmektedir. Sürtünme katsayısının kararlı kısma geçtiği bölüm karşılaştırıldığında EKAP sonrası yapının ana yapıya göre bir miktar daha düşük sürtünme katsayısı değerleri gösterdiği görülmektedir. Öyle ki kararlı kısımdaki ana yapıya ait sürtünme katsayısı değeri 0,51'den EKAP sonrası 0,44 değerlerine düşmüştür. EKAP sonrası çeliğin sürtünme katsayısında meydana gelen bu radikal olmayan azalmanın EKAP sonrası malzemenin sertlik ve mukavemet değerlerindeki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir (Aldajah vd., 2009; Yasavol ve Ramalho 2015). Bilindiği üzere sertlik artışı, aşınma esnasında birbiriyle sürtünen karşılıklı yüzeylerin birbirine nüfuzunu azaltmakta bu da plastik deformasyonun düşmesine neden olarak daha düşük sürtünme katsayılarının elde edilmesine neden olmaktadır (Aldajah vd., 2009; Yasavol ve Ramalho 2015).





**Şekil 6.** Ana yapı ve EKAP sonrası yapıya ait sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimini gösteren eğriler. (The coefficient of friction vs. sliding distance curves for the low carbon steel before and after ECAP.)

Şekil 7'de ana yapı ve EKAP sonrası yapıya ait üç boyutlu aşınma izi görüntüleri ve aşınma derinliği-taranan mesafe eğrileri verilmiştir. 3 boyutlu aşınma izleri ve aşınma derinliği eğrisinden görülebileceği üzere EKAP sonrası numunenin aşınma derinliği azalmıştır. Ayrıca numunelerde kütle kaybı değerleri de ölçülmüş ve bu bulguları destekler sonuçlara ulaşılmıştır. Öyle ki aşınma deneyleri sonrasında ana yapıda meydana gelen 0,8 mg'lık kütle kaybı EKAP sonrasında 0,4 mg değerine düşmüştür. EKAP sonrası çeliğin aşınma direncinin artması veya ağırlık kaybının azalması işlem sonrası elde edilen sertlik ve mukavemet artışından kaynaklanmaktadır. Malzemenin sertlik ve akma mukavemetinde meydana gelen artış, aşınma deneyi sırasında aşındırıcı bilye ile malzeme arasında meydana gelen plastik deformasyona karşı bir direnç oluşturarak malzemenin aşınma dayanımını arttırmaktadır (Huang vd., 2011).

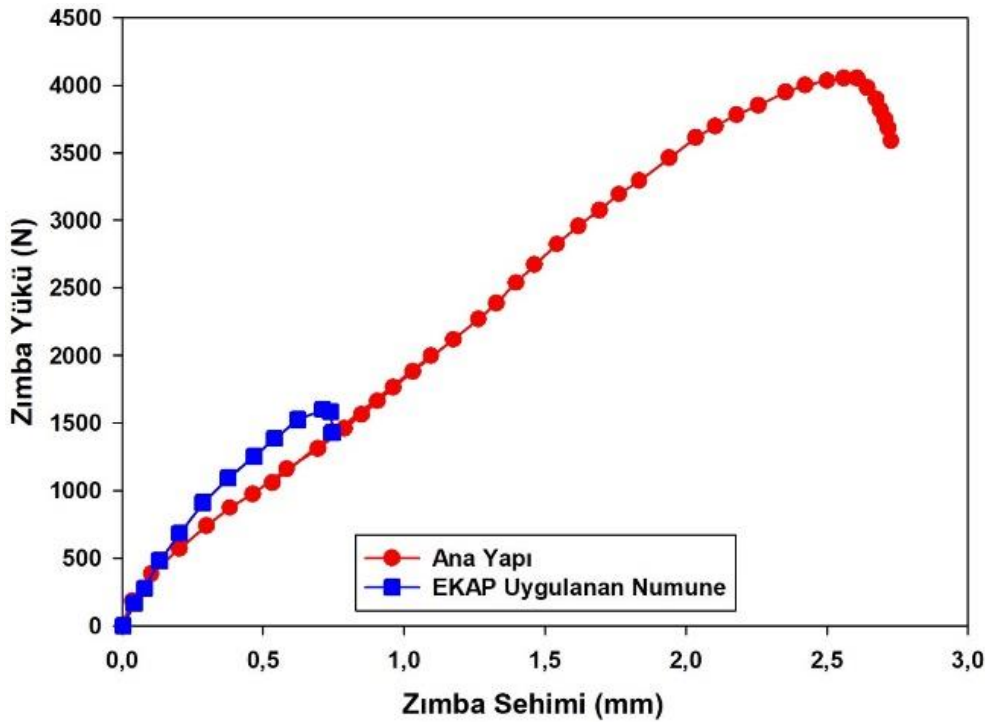


**Şekil 7.** Ana yapı ve EKAP sonrası yapıya ait üç boyutlu aşınma izi görüntüleri ve aşınma derinliği-taranan mesafe eğrileri: (a) Ana yapı ve (b) EKAP sonrası numune. (3D profilometric view of wear tracks and depth-scanned distance curves of the base and ECAPed structure: (a) Base and (b) ECAPed sample.)

### 3.2.3. Şekillendirilebilirlik (Formability)

Erichsen şekillendirilebilirlik deneylerinden elde edilen zımba yükü (N) ve zımba sehimi (mm) eğrileri Şekil 8’de gösterilmiştir. Ayrıca bu eğrilerden elde edilen ve numunede çatlağın başlamasına kadar oluşan sehim değerini gösteren Erichsen indeksi (EI) ve bu sehim anındaki zımba basma yükünü veren ( $F_{EI}$ ) değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Şekil 8 ve Tablo 3’den EKAP sonrası yapının ana yapıya göre zımba sehimi ve zımba yükü değerlerinde önemli bir düşüş meydana geldiği gözlemlenmektedir. Öyle ki ana yapıya ait 2,62 olan EI değeri tek paso EKAP sonrasında 0,68’e düşmüştür. Diğer taraftan EKAP sonrası yapıda EI değerindeki yüksek oranlı düşüşün bir neticesi olarak çatlağın başladığı andaki zımba yükü ( $F_{EI}$ ) değeri de ana yapının kine oranla önemli oranda azalmıştır. Nitekim şekil verilebilirlik deneyi sırasında elde edilen gerekli  $F_{EI}$  değeri ana yapıda 3974 N iken EKAP sonrasında 1652 N’a düşmüştür.

Bilindiği üzere tek paso EKAP işlemi sonrası yapı oldukça yönlendirilmiş tanelerden oluşmaktadır. Bu yapıdaki dislokasyonların da literatürden belli bir doğrultu üzerinde yığınlar halinde bulunduğu ve buna bağlı olarak sürekli alt tane sınırları oluşturduğu da bilinmektedir (Saray vd., 2013; Saray vd., 2014). Bu sınırlar da nispeten fazla gerilme yığılması bölgeleri oluşturarak çatlak başlangıcı ve ilerlemesine neden olmaktadır (Cheng vd., 2003; Zhao vd., 2011). Bu etki de özellikle iki eksenli gerilmenin uygulandığı deformasyon halinde daha da hissedilir hale gelmektedir. Tüm bu bilgiler ışığında tek paso EKAP işlemi sonrasında yapıda meydana gelen zımba sehimi ve zımba yükü değerlerindeki düşüşlerin nedenini anlamak mümkün olmaktadır.



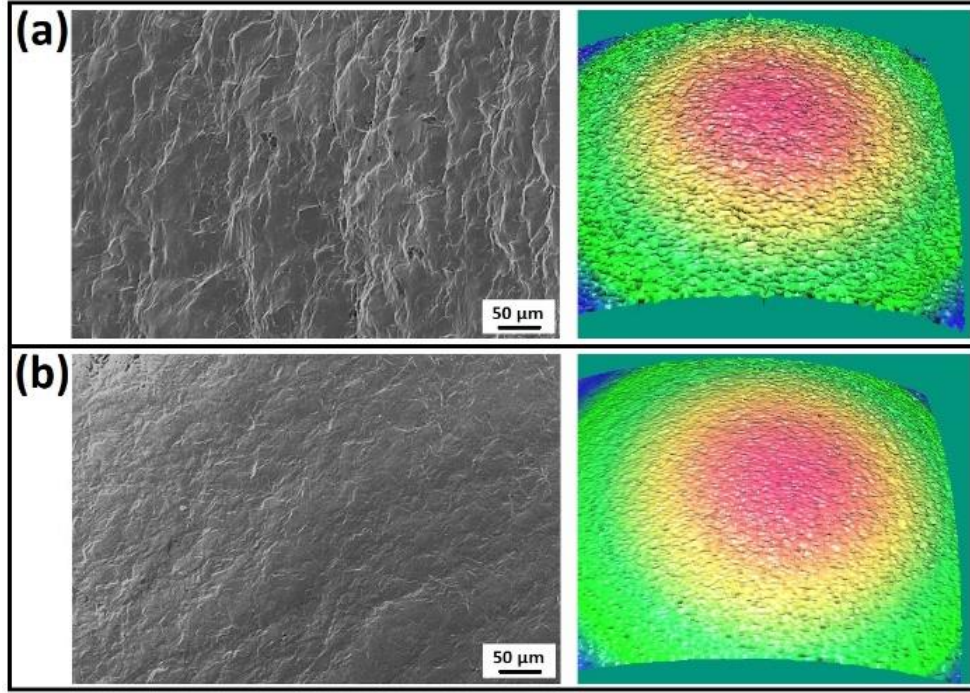
Şekil 8. Ana yapı ve EKAP sonrası yapıya ait zımba yükü – zımba sehimi eğrileri. (Punch load (F)-punch displacement (X) curves of base and ECAPed samples.)

Tablo 3. Erichsen deneyi sırasında ana yapı ve EKAP sonrası yapılardan elde edilen (EI) ve ( $F_{EI}$ ) değerleri. (Erichsen Index (EI) and punch force ( $F_{EI}$ ) of base and ECAPed samples.)

Durum	Erichsen İndeksi (EI) (mm)	Çatlak Başlangıcındaki Zımba Yükü ( $F_{EI}$ ) (N)
Ana Yapı	2,62 ± 0.2	3974 ± 41
EKAP	0,68 ± 0.1	1652 ± 32

Erichsen deneyine tabi tutulmuş numunelerin yüzey SEM görüntüleri ve optik profilometre ile elde edilen üç boyutlu yüzey haritalandırması Şekil 9’da görülmektedir. Görüleceği üzere tek paso EKAP sonrasında Erichsen deneyine tabi tutulan numunelerin yüzey özelliklerinde ana yapıya kıyasla önemli değişimler ortaya çıkmıştır. Öyle ki ana yapıdaki portakal kabuğu etkisi EKAP sonrası numunelerde oldukça azalmıştır. Öte yandan ana yapıda 2,8  $\mu$ m seviyesinde ölçülen yüzey pürüzlüğü değeri de tek paso EKAP işlemi sonrasında 1,1  $\mu$ m seviyelerine inmiştir. Tek paso EKAP işlemi sonrasında numunelerin yüzey pürüzlüğündeki düşüşe işlem sonrasında meydana

gelen tane incelmesinin ve bu tane incelmesi sonrasında taneler arasındaki kristalografik yönelme farkının azalmasının neden olduğu düşünülmektedir (Becker, 1998). Bilindiği üzere yüzey pürüzlüğü yüzeydeki taneler arasındaki yönelme farkıyla orantılıdır (Becker, 1998; Wouters vd., 2005). Dolayısıyla tane incelmesinin sonucunda kesitteki tane boyutu birbirine yakın olan tane sayısı artarak taneler arası deformasyon uyumsuzluğu azalmakta ve böylelikle de yüzey pürüzlüğü azalmaktadır.



**Şekil 9.** Erichsen deneyine tabi tutulmuş numunelerin yüzey SEM görüntüleri ve optik profilometre ile elde edilen üç boyutlu yüzey haritalandırması: (a) Ana yapı ve (b) EKAP sonrası yapı. (SEM micrographs of free dome surfaces and 3D profilometric view of dome surfaces of: (a) base and (b) ECAPed samples.)

#### 4. Genel Sonuçlar (General Results and Discussions)

Bu çalışma kapsamında gemi inşaatında kullanılan düşük-orta mukavemetli çeliğe eş kanallı açısız presleme (EKAP) yöntemi uygulanmış ve işlemin içyapı ve çeşitli mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1- Ana yapıda 25 µm seviyelerinde ölçülen ortalama ferrit tane boyutu tek paso EKAP işlemi sonrasında 7 µm seviyesine inmiştir. Öte yandan ekstrüzyon doğrultusuna dik olarak çıkarılan numunelerin büyük oranda eş eksenli tanelerden oluşurken, ekstrüzyon doğrultusunda çıkarılan numunelerin oldukça yüksek en boy oranına sahip ve yönelmiş ferrit ve perlit tanelerinden oluştuğu belirlenmiştir.

2- Ana yapıya ait 130 Hv0.5 sertlik değeri tek paso EKAP sonrasında işlem esnasında oluşan yoğun plastik deformasyonun sonucu olarak, incelen tane boyutu ve artan dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak 285 Hv0.5 seviyelerine çıkmıştır.

3- Tek paso EKAP öncesi ana yapıda 284 MPa olan akma dayanımı tek paso EKAP sonrası tane incelmesi ve muhtemelen dislokasyon yoğunluğu artışının bir sonucu olarak 414 MPa seviyesine, 402 MPa olan çekme dayanımı ise 795 MPa seviyesine yükselmiştir. Öte yandan EKAP sonrası çeliğin uzama değerlerinde ise önemli bir oranda azalmanın olduğu ve ana yapıdaki uniform uzama değerinin %21,1'den %8,7'ye ve kopma uzaması değerinin ise %36,4'den %12,7'ye düştüğü belirlenmiştir.

4- Tek paso EKAP sonrası yapının ana yapıya göre sürtünme katsayısı değerlerinin malzemede meydana gelen sertlik ve mukavemet artışının bir sonucu olarak bir miktar düştüğü ve 0,51 seviyesinden 0,44 seviyesine indiği belirlenmiştir. Ayrıca ana yapıda ölçülen 0,8 mg'lık kütle kaybının EKAP sonrasında 0,4 mg değerine düştüğü saptanmıştır.

5- Ana yapıya ait 2,62 olan EI değeri tek paso EKAP sonrasında oluşan yönelmiş tanelerin çift eksenli gerilme esnasında malzemenin şekil verilebilirlik performansındaki olumsuz etkisi nedeniyle 0,68'e düşmüştür. Diğer



tarafından EKAP sonrası yapıda EI değerindeki yüksek oranlı düşüşün bir neticesi olarak  $F_{EI}$  değeri de ana yapının kine oranla önemli oranda azalmıştır. Nitekim şekil verilebilirlik deneyi sırasında elde edilen gerekli  $F_{EI}$  değeri ana yapıda 3974 N iken EKAP sonrasında 1652 N'a düşmüştür. Öte yandan şekillendirilebilirlik deneyi sonrasında yüzey pürüzlüğü tek paso EKAP işlemiyle tane inceliğiyle önemli ölçüde azalmıştır.

6- Gemi inşaatında malzemeler hem tek eksenli hem de çok eksenli gerilmelere maruz kalabilmektedir. Bu bağlamda hem tek eksenli gerilme durumunda (çekme eğrisinden) hem de çok eksenli gerilme durumunda (Erichsen şekillendirilebilirlik deneyinden) malzemenin deformasyon kabiliyetinin, meydana gelen pekleşme ile EKAP sonrasında önemli oranda azaldığı belirlenmiştir.

### Teşekkür (Acknowledgement)

Çalışma kapsamında laboratuvar imkânlarının kullanılması noktasındaki katkılarından ötürü Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Genççağ PÜRÇEK'e teşekkürü bir borç bilirim.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

### Kaynaklar (References)

- Aldajah, S.H., Ajayi, O.O., Fenske, G.R., David, S., 2009. Effect of friction stir processing on the tribological performance of high carbon steel. *Wear*, 267(1-4), 350-355.
- Becker, R., 1998. Effects of strain localization on surface roughening during sheet forming. *Acta Materialia*, 46(4), 1385-1401.
- Bhadeshia, H. ve Honeycombe, R., 2011. *Steels: Microstructure and Properties*, Elsevier Science,.
- Cheng, S., Spencer, J.A., Milligan, W.W., 2003. Strength and tension/compression asymmetry in nanostructured and ultrafine-grain metals. *Acta Materialia*, 51(15), 4505-4518.
- Demirtas, M., Kawasaki, M., Yanar, H., Purcek, G., 2018. High temperature superplasticity and deformation behavior of naturally aged Zn-Al alloys with different phase compositions. *Materials Science and Engineering: A*, 730, 73-83.
- Demirtas, M., Purcek, G., Yanar, H., Zhang, Z.J., Zhang, Z.F., 2015. Effect of equal-channel angular pressing on room temperature superplasticity of quasi-single phase Zn-0.3Al alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 644, 17-24.
- Demirtaş, M., 2017. Çinko-Esaslı Süperplastik Alaşımların Geliştirilmesi ve Yapısal, Mekanik ve Titreşim Sönümleme Davranışlarının İncelenmesi. Trabzon, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Dobatkin, S.V., Skrotzki, W., Rybalchenko, O.V., Terent'ev, V.F., Belyakov, A.N., Prosvirnin, D.V., Raab, G.I., Zolotarev, E.V., 2018. Structural changes in metastable austenitic steel during equal channel angular pressing and subsequent cyclic deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 723, 141-147.
- Ebrahimi, M., Attarilar, S., Shaeri, M.H., Gode, C., Armoon, H., Djavanroodi, F., 2019. An investigation into the effect of alloying elements on corrosion behavior of severely deformed Cu-Sn alloys by equal channel angular pressing. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19(3), 842-850.
- Eyres, D.J., 2001. *Ship Construction*, Butterworth-Heinemann.
- Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T.G., 2001. Review: Processing of metals by equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Science*, 36(12), 2835-2843.
- Gholinia, A., Prangnell, P.B., Markushev, M.V., 2000. The effect of strain path on the development of deformation structures in severely deformed aluminium alloys processed by ECAE. *Acta Materialia*, 48(5), 1115-1130.
- Hayat, F., Uzun, H., 2011. Effect of Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Ship and Dual Phase Steels. *Journal of Iron and Steel Research International*, 18(8), 65-72.
- Horikiri, G., Kitazumi, T., Natori, K., Tanaka, T., 2017. Improvement in mechanical properties of semi-solid AA7075 aluminum alloys by Equal-Channel Angular Pressing. *Procedia Engineering*, 207, 1451-1456.
- Huang, S.J., Semenov, V.I., Shuster, L.S., Lin, P.C., 2011. Tribological properties of the low-carbon steels with different microstructure processed by heat treatment and severe plastic deformation. *Wear*, 271(5), 705-711.
- Islamgaliev, R.K., Nikitina, M.A., Ganeev, A.V., Sitdikov, V.D., 2019. Strengthening mechanisms in ultrafine-grained ferritic/martensitic steel produced by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 744, 163-170.
- Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T.G., 1998. The process of grain refinement in equal-channel angular pressing. *Acta Materialia*, 46(9), 3317-3331.
- Kim, H.S., Ryu, W.S., Janeczek, M., Baik, S.C., Estrin, Y., 2005. Effect of Equal Channel Angular Pressing on Microstructure and Mechanical Properties of IF Steel. *Advanced Engineering Materials*, 7(1-2), 43-46.
- Klepaczko, J.R., Rusinek, A., Rodríguez-Martínez, J.A., Peçherski, R.B. ve Arias, A., 2009. Modelling of thermo-viscoplastic behaviour of DH-36 and Weldox 460-E structural steels at wide ranges of strain rates and temperatures, comparison of constitutive relations for impact problems. *Mechanics of Materials*, 41(5), 599-621.
- Langdon, T.G., 2007. The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 462(1), 3-11.
- Levin, Z.S., Brady, B.G., Foley, D.C., Hartwig, K.T., 2019. Recrystallization behavior of tungsten processed by equal channel angular extrusion at low homologues temperature: Microstructure, hardness, and texture. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, accepted manuscript.

- Li, Y., Pang, Ng. H., Jung, H.D., Kim, H.E., Estrin, Y., 2014. Enhancement of mechanical properties of grade 4 titanium by equal channel angular pressing with billet encapsulation. *Materials Letters*, 114, 144-147.
- Maier, G.G., Astafurova, E.G., Maier, H.J., Naydenkin, E.V., Raab, G.I., Odessky, P.D., Dobatkin, S.V., 2013. Annealing behavior of ultrafine grained structure in low-carbon steel produced by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 581, 104-107.
- Niendorf, T., Canadinc, D., Maier, H.J., Karaman, I., Sutter, S.G., 2006. On the fatigue behavior of ultrafine-grained interstitial-free steel. *International Journal of Materials Research*, 97(10), 1328-1336.
- Saray, O., Purcek, G., Karaman, I., Maier, H.J., 2013. Formability of Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(9), 4194-4206.
- Saray, O., Purcek, G., Karaman, I., Maier, H.J., 2014. Improvement of formability of ultrafine-grained materials by post-SPD annealing. *Materials Science and Engineering: A*, 619, 119-128.
- Saray, O., Purcek, G., Karaman, I., Niendorf, T., Maier, H.J., 2011. Equal-channel angular sheet extrusion of interstitial-free (IF) steel: Microstructural evolution and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 528(21), 6573-6583.
- Segal, V.M., 1999. Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation. *Materials Science and Engineering: A*, 271(1), 322-333.
- Sekban, D.M., Aktarer, S.M., Xue, P., Ma, Z.Y., Purcek, G., 2016. Impact toughness of friction stir processed low carbon steel used in shipbuilding. *Materials Science and Engineering: A*, 672, 40-48.
- Sekban, D.M., Akterer, S.M., Saray, O., Ma, Z.Y., Purcek, G., 2018. Formability of friction stir processed low carbon steels used in shipbuilding. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(1), 237-244.
- Shaeri, M.H., Shaeri, M., Salehi, M.T., Seyyedain, S.H., Abutalebi, M.R., 2015. Effect of equal channel angular pressing on aging treatment of Al-7075 alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*, 25(2), 159-168.
- Smirnov, I., Konstantinov, A., 2018. Influence of ultrafine-grained structure produced by equal-channel angular pressing on the dynamic response of pure copper. *Procedia Structural Integrity*, 13, 1336-1341.
- Suresh, M., Sharma, A., More, A.M., Kalsar, R., Bisht, A., Nayan, N., Suwas, S., 2019. Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on the evolution of texture, microstructure and mechanical properties in the Al-Cu-Li alloy AA2195. *Journal of Alloys and Compounds*, 785, 972-983.
- Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K., Alexandrov, I.V., 2000. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*, 45(2), 103-189.
- Valiev, R.Z., Langdon, T.G., 2006. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*, 51(7), 881-981.
- Wouters, O., Vellinga, W.P., Tijum, R.V., de Hosson, J.T.M., 2005. On the evolution of surface roughness during deformation of polycrystalline aluminum alloys. *Acta Materialia*, 53(15), 4043-4050.
- Yanxia, G., Aibin, M., Jinghua, J., Dan, S., 2017. Research Progress of Ultrafine-Grained Pure Titanium Produced by Equal-Channel Angular Pressing. *Rare Metal Materials and Engineering*, 46(12), 3639-3644.
- Yasavol, N., Ramalho, A., 2015. Wear properties of friction stir processed AISI D2 tool steel. *Tribology International*, 91, 177-183.
- Zhao, Y., Topping, T., Li, Y., Lavernia, E.J., 2011. Strength and Ductility of Bi-Modal Cu. *Advanced Engineering Materials*, 13(9), 865-871.



## STATION KEEPING OF WIND DRIVEN STRATOSPHERIC BALLOON VIA PROPULSION UNIT

Öznur KAYHAN\*

Gebze Technical University, Engineering Faculty, Department of Chemical Engineering, Kocaeli, Turkey

### Keywords

*Stratospheric Balloon,  
Station Keeping,  
Propulsion Power,  
Wind Velocity,  
Horizontal Control.*

### Abstract

One of the most difficult problems in stratospheric balloon's design is to keep the balloon's geographic coordinates. Stratospheric wind speeds vary significantly both daily and throughout the year. Wind drag acting on the balloon should be manipulated to control the horizontal coordinates (longitude and latitude degree) of the stratospheric balloons. In this paper, propulsion unit is applied to a wind driven stratospheric balloon to keep balloon's coordinate over flight area. The simulation was applied to a zero-pressure high altitude balloon using actual wind profile for the first time to control the horizontal movement of the balloon. In addition, required thrust power and some parameters effects on it have been investigated. The results indicate that propulsion unit would be helpful to manipulate the horizontal motion of the balloon and to achieve keeping the balloon's geographic location.

## RÜZGAR SÜRÜKLEMELİ STRATOSFERİK BALONUN İTME ÜNİTESİ İLE İSTASYON KORUMASI

### Anahtar Kelimeler

*Stratosferik Balon,  
İstasyon Koruması,  
İtme Gücü,  
Rüzgar Hızı,  
Yatay Kontrol.*

### Öz

Stratosferik balon tasarımında en zorlu problemlerden birisi de balonun coğrafik koordinatlarının korunmasıdır. Stratosferik rüzgar hızları hem günlük hem de yıl boyunca önemli ölçüde değişir. Balon üzerinde etkisi olan rüzgar sürüklemesi stratosferik balonların yatay koordinatlarını (enlem ve boylam derecesi) kontrol etmek için manipüle edilmelidir. Bu makalede, itme ünitesi rüzgar sürüklemeli stratosferik balona balonun uçuş alanı üzerinde koordinatlarının korunması için uygulanmıştır. Simülasyon, rüzgar sürüklemeli sıfır basınçlı yüksek irtifalı balona balonun yatay hareketini kontrol etmek için gerçek rüzgar profili kullanılarak ilk kez uygulanmıştır. Buna ek olarak, gerekli itici güç ve bunun üzerindeki bazı parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, uygulanan itme ünitesinin balonun yatay hareketini engelleyerek balonun coğrafik konumunun korunmasına yardımcı olabileceğini göstermiştir.

### Alıntı / Cite

Kayhan, Ö., (2020). Station Keeping of Wind Driven Stratospheric Balloon via Propulsion Unit, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(1), 252-261.

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

Ö. Kayhan, 0000-0002-1447-2952

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	21.02.2018
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	16.09.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	30.10.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

### 1. Introduction

Air vehicles can be divided into static lift air vehicles, and dynamic lift aircrafts. High altitude balloons and airships are examples of static lift air vehicles and airplanes and missiles are examples of dynamic lift aircrafts. Static lift air vehicles have the advantage due to their low speed and high altitude operation. Therefore, they are recommended as stratospheric platforms floating at a high altitude (18. 000 m to 36.500 m) of the atmosphere named stratosphere and atmospheric density is very low in this layer (Chen et al., 2014).

\* İlgili yazar / Corresponding author: okayhan@gtu.edu.tr, +90-262-605-2116

High altitude balloons are lighter than air (LTA) controllable flight vehicles flying at stratosphere, where wind speed is less intense and wind direction is relatively stable. Balloon systems have ability to observe wide-area coverage for extended durations that satellites and aircrafts cannot have. High altitude platforms positioned in the stratosphere due to propose image quality for observation compared to space-based platforms have been attractive interest for many years. High altitude self-propelled stratospheric balloons capable of keeping station over a desired geographic location would be a low-cost alternative platform to achieve variety of space missions such as scientific experiments, observation, surveillance and tele communication purposes (Yang and Liu, 2017; Fesen and Brown, 2015; Fesen, 2006).

Stratospheric wind speeds around 20,000 m can vary significantly both daily and throughout the year (Fesen and Brown, 2015). Wind drag acting on the balloon causes to migrate the balloon in stratospheric layer of the atmosphere horizontally and this migration should be manipulated to control the high-altitude balloon geographic horizontal coordinates and to hold the balloon's station within the selected region. Integration of propulsion unit into balloon system can be a method to keep the balloon's horizontal coordinates. Propulsion power is one of the significant problems of balloon's design to keep the balloon at desired altitude for extended durations.

Many research projects have been conducted on high altitude balloons, but most of these researches investigated the balloon material to go higher altitude, thermal analysis of the lift gas or geometric design of the balloon and flight trajectory. Some of them have proposed methods to control position of high altitude airship and super pressure balloon. Chen et al. (2014) designed control system of a multi vectored thrust for stratospheric airship. Fesen and Brown (2015) described general framework of station keeping of airship. Wynsberghe and Turak (2016) proposed an electric propulsion system for super pressure balloon. There has been no study to control the high altitude zero pressure balloon's position in real region that includes real wind profile up until now. Author's previous study (Kayhan and Hastaoğlu, 2014) implies modeling of stratospheric balloon using transport phenomena and gas compress - release system to place balloon at its orbit without using ballast, to control the vertical movement and extend the flight time. Also, author studied simulation and control of serviceable stratospheric balloon traversing a region via transport phenomena and PID (proportional-integral-derivative) control (Kayhan et al., 2016) to place the balloon at target altitude and ensure balloon's horizontal flights over desired coordinates and interfere with the balloon system whenever technical service is needed. These two studies were proposed for the first time.

The purpose of this study is to integrate propulsion unit into wind driven zero pressure balloon system to manipulate the horizontal movement of the stratospheric balloon and to hold it over the launch location. The balloon system in this study includes not only altitude control but also longitude and latitude coordinate control that have not been studied in the same study before. Results could be useful to control the balloon's flight within the desired coordinates and design of the propulsion unit and power system.

## 2. Theory

For the stratospheric balloons, a model was developed based on balloon dynamics, heat and mass transfer aspects in previous study (Kayhan and Hastaoğlu, 2014). Three of the major equations are reproduced below from the previous work:

Balloon velocity in vertical direction is:

$$\frac{dv_z}{dt} = -\frac{v}{\|v\|} C_d \frac{1}{2M} \rho_{air} v_z^2 A_p + \frac{\rho_b - \rho_{air}}{\rho_b} g \quad (1)$$

Lift gas leak:

$$N_A = k_{ci}(C_{ib} - C_1) = D_{ABre} \frac{(C_1 - C_2)}{\Delta x} = k_{co}(C_2 - C_{out}) \quad (2)$$

Temperature of the lift gas:

$$q_T = h_{ci}(T_1 - T_{ib}) + q_{i,\infty} = \frac{k_f}{\Delta x}(T_2 - T_1) = h_{co} (T_a - T_2) + \alpha q_{rad} + q_{e,\infty} \quad (3)$$

where  $M$ ,  $\rho_{air}$ ,  $\rho_b$ ,  $A_p$ ,  $g$  are total weight of the balloon and auxiliary equipment (kg), density of air and balloon system ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), projected area of the balloon ( $\text{m}^2$ ), gravitational acceleration ( $\text{m}/\text{s}^2$ );  $N_A$ ,  $k_{ci}$ ,  $k_{co}$ ,  $C_{ib}$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_{out}$ ,  $D_{ABre}$ ,  $\Delta x$

are lift gas flux through balloon ( $\text{kmol/m}^2\text{s}$ ), convective mass transfer coefficients at the inside of the balloon and outside balloon surfaces ( $\text{m/s}$ ), lift gas concentrations at inside, inside balloon and outside balloon surfaces, and outside of the balloon ( $\text{kmol/m}^3$ ), real effective diffusion coefficient ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), balloon wall thickness ( $\text{m}$ );  $q_T, h_{ci}, h_{co}, T_1, T_2, T_{ib}, T_a, k_f, \alpha, q_{ib}, q_{e}, q_{rad}$  are total heat flux for the lift gas ( $\text{W/m}^2$ ), convective heat transfer coefficients inside and outside surfaces of the balloon ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ), temperature of the lift gas at the inside and outside surfaces of the balloon, bulk temperature of the lift gas and atmospheric temperature ( $\text{K}$ ), thermal conductivity of the balloon wall ( $\text{W/mK}$ ), solar absorptivity of the balloon film, internal and external infrared radiation density and solar radiation flux ( $\text{W/m}^2$ ), respectively.

In order to determine aerodynamic forces and heat and mass transfer coefficients one needs to know the relative wind velocity and its components with respect to the balloon's motion. When wind drag over the balloon is not manipulated wind drifts the balloon from the floating coordinate. Dynamic forces in the presence of the wind over the balloon were determined author's previous study (Kayhan et al., 2016) and were calculated by using following equations below (Farley, 2005):

$$\begin{aligned}v_{rx} &= v_{wx} - v_x \\v_{ry} &= v_{wy} - v_y \\v_{rz} &= v_{wz} - v_z\end{aligned}\quad (4)$$

where  $v_x, v_y, v_z$  ( $\text{m/s}$ ) are the balloon's velocity components  $v_{wx}, v_{wy}, v_{wz}$  ( $\text{m/s}$ ) are the wind velocity components, then the relative velocity components of the balloon,  $v_{rx}, v_{ry}, v_{rz}$  ( $\text{m/s}$ ) in  $x, y, z$  direction of the balloon coordinate, respectively. The relative velocity of the balloon ( $v_r$ ) is obtained from:

$$v_r = (v_{rx}^2 + v_{ry}^2 + v_{rz}^2)^{1/2} \quad (5)$$

Drag force magnitude is:

$$Drag = -\frac{1}{2} \rho_{air} v_r^2 C_d A_p \quad (6)$$

where  $C_d$  is the drag coefficient and  $A_p$  ( $\text{m}^2$ ) is the projected area of the balloon. When the drag is written into its vector components:

$$\begin{aligned}Drag_x &= Drag v_{rx}/v_r \\Drag_y &= Drag v_{ry}/v_r \\Drag_z &= Drag v_{rz}/v_r\end{aligned}\quad (7)$$

Balloon vertical velocity ( $v_z$ ) can be calculated as follow:

$$\frac{dv_z}{dt} = \frac{Drag_z}{M} + \frac{\rho_b - \rho_{air}}{\rho_b} g \quad (8)$$

If buoyancy forces are ignored in horizontal directions due to density variations, horizontal velocities can be obtained from:

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{Drag_x}{M} \quad \frac{dv_y}{dt} = \frac{Drag_y}{M} \quad (9)$$

In  $x, y, z$  directions, velocities and displacement components of the balloon can be calculated through integration of the Equations (8,9).

Figure 1 shows thrust configuration of balloon system and balloon's coordinate system. These thrusters as seen in Figure 1 can be applied to balloon to counter the prevailing stratospheric winds.

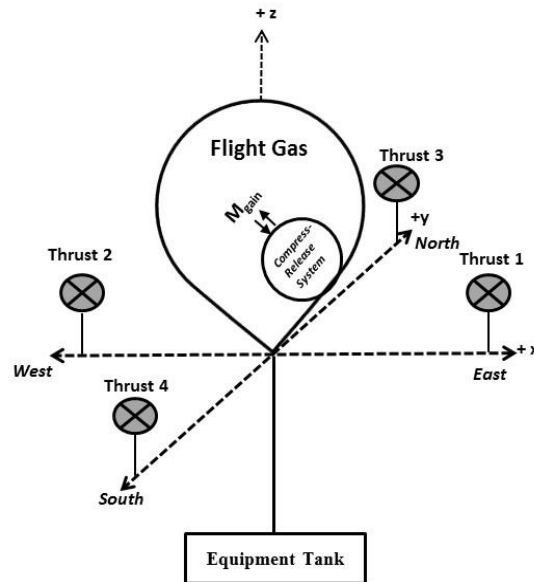


Figure 1. Thrust configuration of balloon system

Thrust power required ( $P_{thrust}$ ) for the balloon system and total drag force can be calculated from

$$P_{thrust} = D_{total} \left( \frac{v_r}{\eta_p \eta_g} \right) \quad (10)$$

$$D_{total} = \sqrt{(Drag_x^2 + Drag_y^2)} \quad (11)$$

Thrust force is applied only to horizontal directions (x, y) of the balloon to manipulate the wind effect. The wind velocity at 'z' direction is zero in float region of the balloon and neglected. In the Equation (10)  $\eta_p$  is the propulsive efficiency,  $\eta_g$  is the gear box transition efficiency determined equal to 85, 80 % (Sultana et al., 2015) respectively.

### 3. Numerical Method

In this study integration of propulsion unit to balloon main system is shown schematically in Figure 1 and balloon program including thrust unit codes were written in Fortran. The program flow chart is shown in Figure 2. As shown in Figure 2, balloon main program consists of subroutines which are atmospheric model, heat and mass transfer model of lifting gas, dynamic and control model of the balloon.

The balloon system consists of helium inside as flight gas and Gas-Compress-Release control system. Before the launch, on the ground, a certain amount of helium was pumped into the balloon until it started to rise from the ground. Balloon was controlled to reach the target altitude (H) and steadied at its orbit. When the balloon ascends over the target altitude, the lift gas inside the balloon (helium initially) is evacuated in a controlled manner ( $M_{gain}$ ) by pumping it to the Lift-Gas-Storage. Thus, the volume of the balloon decreases preventing its rise further. At altitudes higher than the target value, pumping is continued until the balloon starts to descend below the target altitude. However, at altitudes lower than the target value, Lift-Gas is released into the balloon from the helium storage tank. The Compress-Release cycle is continued until all available storage gas is consumed due to escape through the balloon wall. Naturally, then the descent starts, and a certain amount of lift gas is to be kept accommodating a soft landing.

Control model includes vertical and horizontal movement control of the balloon. Gas-compress release system controls the altitude and vertical velocity of the balloon, propulsion unit controls the horizontal velocity and movement of the balloon. Control systems ensure to reach the balloon to desired altitude (H) and keep it at constant longitude, latitude coordinates for required time. Subroutines that form the balloon main program work systematically each other well. It is important to note that system was solved via numerical techniques using iterative scheme.

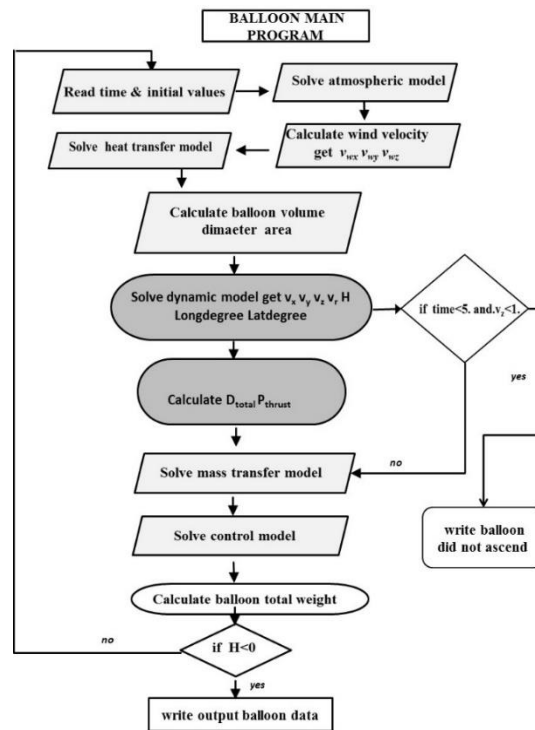


Figure 2. Balloon main program including propulsion unit

#### 4. Wind Profile of the Flight Region

The wind characteristic plays an important role in obtaining horizontal motion of the balloon. Wind profile to a large degree, depends on the location, time of the year and altitude (Colozza, 2003). Wind velocity consists of longitude and latitude components, and the angle to the south (Liu et al., 2014).

To simulate the balloon system Erzurum, one of the cities of Turkey, was chosen as launch station. A sample of wind profile is shown in Figure 3 and 4 which covered an altitude of 0 to 16.785 km. Because of available wind profile simulation, floating was limited to this altitude.

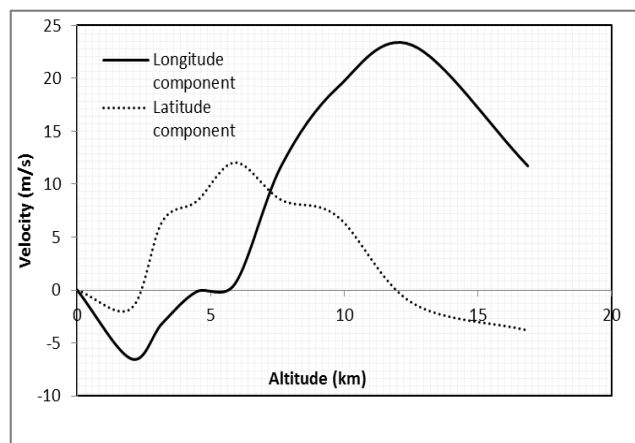
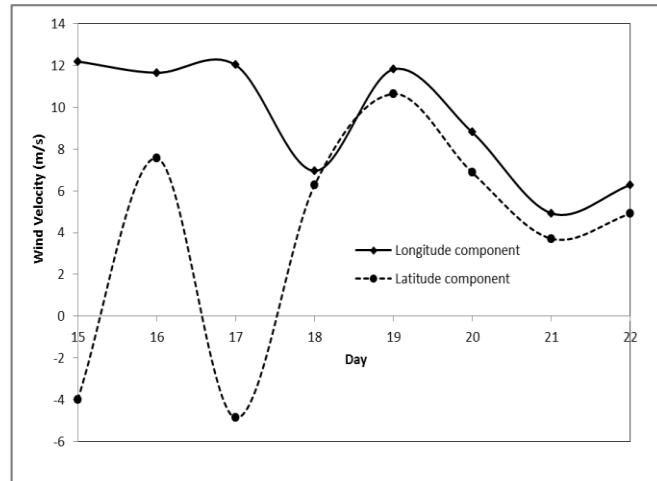


Figure 3. The measured variation of wind velocity with altitude for launch station, 15 August 2014 at 12:00 noon (Courtesy of the General Directorate of Meteorology of Turkey)





**Figure 4.** The measured variation of wind velocity at 16,785 m altitude for launch station in 15-22 August 2014 (Courtesy of the General Directorate of Meteorology of Turkey)

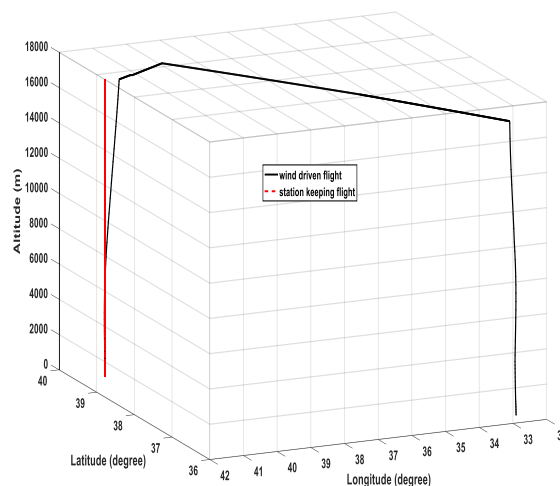
**5. Numerical Results**

The stratospheric balloon model based on transport phenomena (momentum, mass and heat transfer), Gas-Compress-Release system and wind driven balloon dynamic performance used in this work were validated in author’s previous studies (Kayhan et al., 2016; Kayhan and Hastaoğlu, 2014).

For the station keeping performance simulation of balloon over Turkey, parameters are chosen as seen in Table 1. The balloon was assumed to launch at 08:00 am on August 15, 2014 from Erzurum (39.53°N, 41.16°E, 0 m). Because of the available wind data, balloon was controlled to reach design altitude of 16,785 m. Figure 5 shows 3-D trajectories of the balloon wind driven flight and station keeping flight. The balloon in wind driven flight moved from launch station to a land station (36.24 °N, 32.64 °E, 0 m). The balloon drifted with the wind in horizontal direction and 16,785 m altitude. Note that there is no control mechanism for horizontal movement of the wind driven balloon flight. It can be seen from the Figure 5 that when horizontal movement control is applied to the balloon via propulsion unit, the balloon does not drift away by the wind and keep longitude and latitude coordinates (39.53°N, 41.16°E) and only flies at vertical (z) direction.

**Table 1.** Design parameters of the balloon

Parameter	Value
Maximum volume, m <sup>3</sup>	29,878
Floating altitude, m	16,785
Helium weight, kg	700
Store weight, kg	500
Equipment weight, kg	1000



**Figure 5.** 3-D trajectory of the wind driven balloon’s flight and station keeping flight

Figure 6 shows the variation of the flight time with the altitude for the station keeping flight as seen in Figure 5 and velocity and relative velocity components of the balloon for station keeping flight are depicted in the Figure 7.

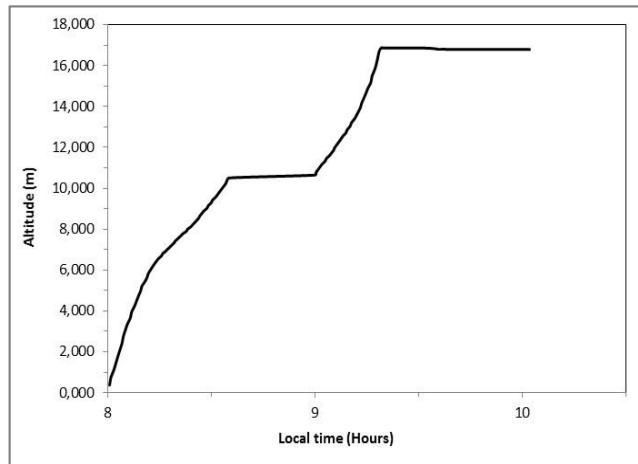


Figure 6. Variation of the flight time with the altitude for ascending stage of station keeping flight

Velocities of the horizontal directions ( $V_x$ ,  $V_y$ ) were obtained as zero and accomplished by propulsion unit throughout the flight to target altitude.

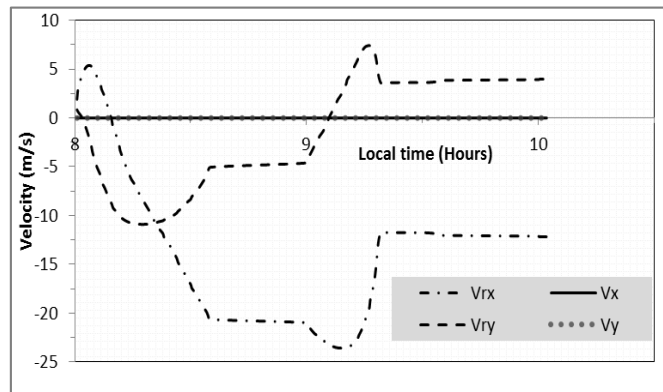
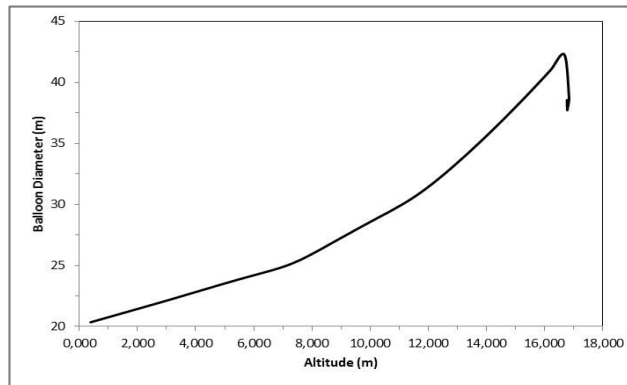
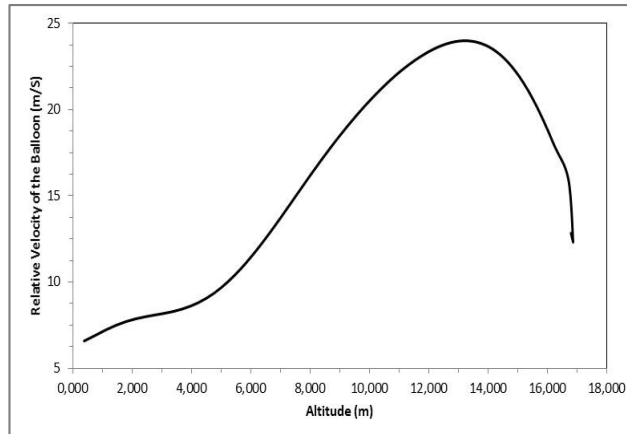


Figure 7. Variation of the flight time with horizontal velocities of the balloon for ascending stage of station keeping flight

Balloon diameter varies with altitude at ascending stage as seen in Figure 8 due to decrease in atmospheric pressure and density. The maximum diameter has been calculated as 43 m. When balloon reaches over the target altitude gas-compress altitude- velocity control mechanism works and diameter descends to keep the altitude at 16,785 m. Besides, relative velocity of the balloon increases with altitude until altitude is 12,500 m and then decreases to target altitude as seen in Figure 9. Because, the wind velocity variation with altitude affects the balloon horizontal movement as seen in Figure 3.



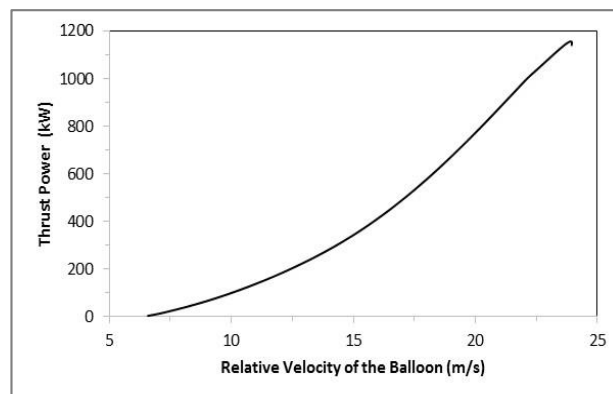
**Figure 8.** Variation of balloon diameter with altitude for ascending stage of the station keeping flight



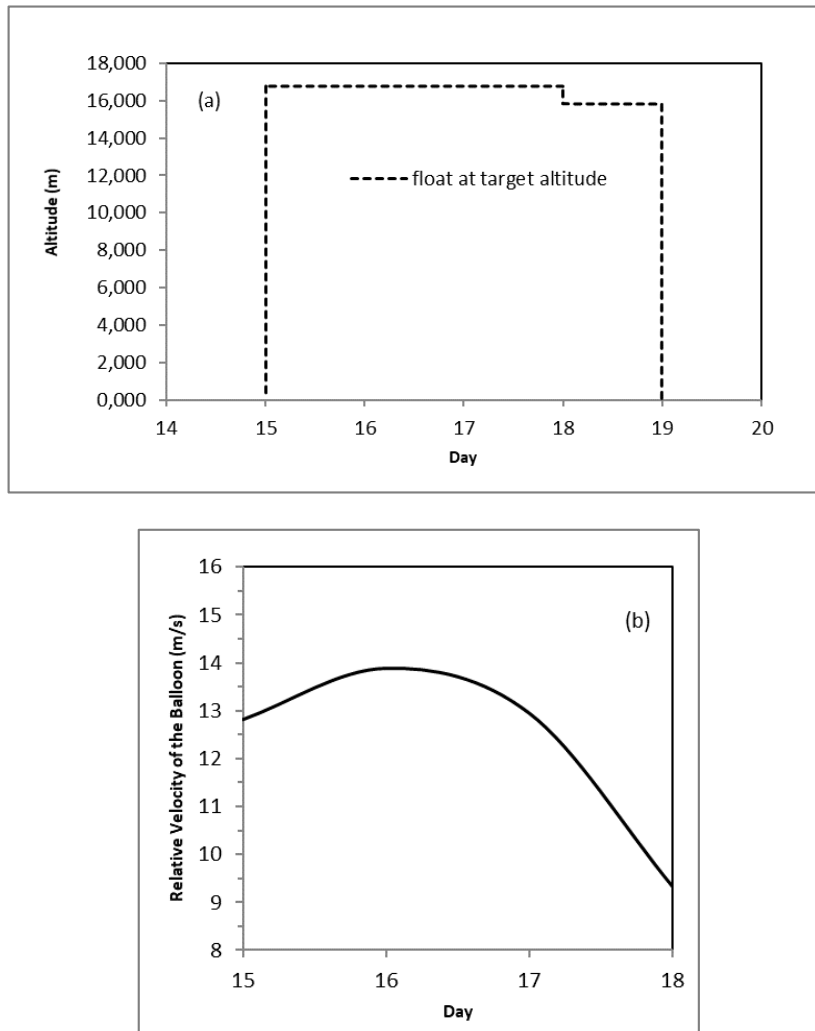
**Figure 9.** Balloon relative velocity-altitude variation for ascending stage of the station keeping flight

The drag is proportional to the square of relative velocity. Power is drag times velocity. Therefore, propulsion power is proportional to cube of relative velocity. As seen in Figure 10, when relative velocity is 25 m/s, required thrust power obtained over 1000 kW. This amount of power can be supplied for a balloon using photovoltaic panel (Kayhan, 2018; Wang et al., 2007) and lightweight electric motors (Kongl et al., 2012).

It was found in previous study (Kayhan and Hastaoğlu, 2014) that when mass transfer coefficient decreases, flight time increases. To observe the thrust power for the extended flight, effective mass transfer coefficient was decreased, and it was possible to keep the balloon at 16,785 m for four days as seen in the Figure 11(a) and relative velocity variation of balloon in the Figure 11 (b).

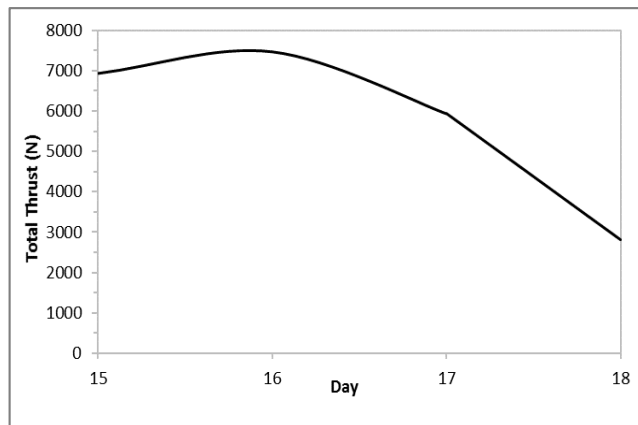


**Figure 10.** Balloon relative velocity-thrust power variation for ascending stage of the station keeping flight

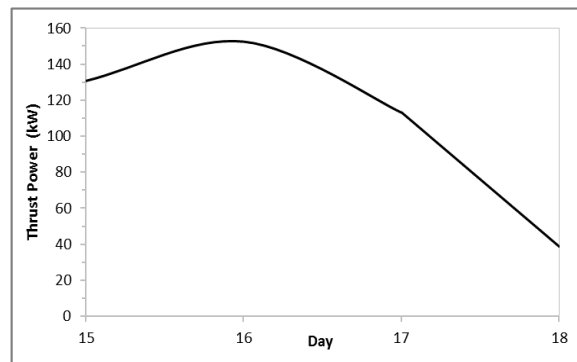


**Figure 11.** Station keeping balloon flight (a) flight day-altitude variation in August (b) flight day-relative velocity of the balloon variation in August

For three days flight of the balloon over station at float altitude as seen in Figure 13, it was found that required thrust power is between 40-155 kW. This power is smaller than the required power of ascending stage of the balloon when consider with Figure 10. This result shows that in order to keep the horizontal coordinates of the balloon at floating stage needs less power than at ascending stage.



**Figure 12.** Total thrust variation with flight days of station keeping flight in August



**Figure 13.** Thrust power variation with flight days of station keeping flight in August

## 6. Result and Discussion

Wind driven balloon system via propulsion unit has been simulated to manipulate the wind drag over stratospheric balloon to keep the balloon at desired geographic coordinates. For the ascending and the floating stage of the station keeping flight, required thrust and power have been numerically investigated. The simulation was run for stratospheric balloon that have 29,878 m<sup>3</sup> maximum volume launches from the selected launch station. The vertical velocity control unit of gas compress release helps the balloon reach the target altitude, keep it there for desired period. The horizontal velocity control of propulsion unit helps manipulate the wind drag and keep the balloon at desired horizontal longitude and latitude coordinates. Therefore, it is possible to control the horizontal movement of the wind driven balloon over a country or region by propulsion unit. In keeping the balloon at target coordinates required power for ascending and floating is obtained maximum 1156 kW, 153 kW, respectively. It is concluded that propulsion unit needs less energy for floating than ascending stage of the station keeping flight of the balloon. Future work involves developing alternative method for power management of ascending stage of the balloon.

## Acknowledgments

The support of Professor M. Alaittin Hastaoğlu (Author's PhD supervisor-retired) is gratefully acknowledged. The General Directorate of Meteorology of Turkey is gratefully acknowledged for supplying the wind data.

## Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

## References

- Chen, L., Zhang, H., Duan, DP., 2014. Control System Design of a Multivector Thrust Stratospheric Airship. *Journal of Aerospace Engineering*, 228, 2045-2054.
- Colozza, A., 2003. Initial Feasibility Assessment of a High-Altitude Long Endurance Airship. NASA report: 14248.
- Farley, R. E., 2005. Balloon ascent: 3-D Simulation Tool for the Ascent and Float of High Altitude Balloons in: AIAA 5<sup>th</sup> Aviation, Technology, Integration and Operation Conference, AIAA, Virginia.
- Fesen, R., Brown, Y., 2015. A Method for Establishing a Station Keeping, Stratospheric Platform for Astronomical Research. *Experimental Astronomy*, 39, 475-493.
- Fesen, R.A., 2006. A High Altitude Station Keeping Astronomical Platform. SPIE Astronomical Telescopes+Instrumentation, Orlando, Florida, United States.
- Kayhan, Ö., Hastaoğlu, M. A., 2014. Modeling of Stratospheric Balloon Using Transport Phenomena and Gas Compress-Release System. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 28, 534-541.
- Kayhan, Ö., Yücel, Ö., Hastaoğlu, M.A., 2016. Simulation and Control of Serviceable Stratospheric Balloons Traversing a Region via Transport Phenomena and PID. *Aerospace Science and Technology*, 53, 232-240.
- Kayhan, Ö., 2018. A thermal Model to Investigate the Power Output of Solar Array for Stratospheric Balloons in Real Environment. *Applied Thermal Engineering*, 139, 113-120.
- Kongl, C., Park, H., Lee1, K., Choi, W., 2012. A Study on Structural Design and Analysis of Composite Propeller Blade of Turboprop for High Efficiency and Light Weight, ECCM15 - 15th European Conference on Composite Materials, Venice, Italy.
- Liu, Q., Wu, Z., Zhu, M., Xu, W.Q., 2014. A Comprehensive Numerical Model Investigating the Thermal - Dynamic Performance of Scientific Balloon. *Advances in Space Research*, 53, 325-328.
- Sultana, H., Yerranagu, S., Veeranjanyulu, K., 2015. Sizing and Sensivity Analysis of High Altitude Airship. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 5, 139-144.
- Wang, H., Song, B., L, Zuo., 2007. Effect of High Altitude Airship's Attitude on Performance of Its Energy System. *Journal of Aircraft*, 44, 2077-2079.
- Wynsberghe, E., Turak, A., 2016. Station-keeping of a High-Altitude Balloon with Electric Propulsion and Wireless Power Transmission: A concept study. *Acta Astronautica*, 128, 616-627.
- Yang, X., Liu, D., 2017. Renewable Power System Simulation and Endurance Analysis for Stratospheric Airships. *Renewable Energy*, 113, 1070-1076.



## F KLAVYE İÇİN METİN ANALİZİ TABANLI KELİME TAMAMLAMA SİSTEMİ

Bergen KARABULUT\*, Halil Murat ÜNVER

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Alternatif Teknoloji,  
Kelime Tamamlama,  
Kelime Tahmin,  
Tuşlama Tasarrufu,  
F Klavye.*

### Öz

Kelime tamamlama, kullanıcının basması gereken tuş sayısını azaltmayı hedefleyen bir yardımcı teknoloji aracıdır. İlk çalışmalarda, genellikle bir alternatif ve destekleyici iletişim aracı olarak ele alınmıştır. Fakat son dönemlerde kelime tamamlama sistemleri; mobil cihazlar, makine çevirisi ve arama motorları gibi farklı alanlarda da önem kazanmıştır. Bu çalışmada, Standart Türkçe Klavye olan F klavye için metin analizi tabanlı bir kelime tamamlama sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemi test etmek için zabıt kâtiplerinin yoğun klavye kullanımından dolayı Adalet Bakanlığı tarafından yapılan zabıt kâtipliği sınavlarına ait 160 metin kullanılmıştır. Bu metinlerdeki kelimelerin *unigram* ve *bigram* frekansları çıkarılmış ve bir veritabanında tutulmuştur. Sistem, bu veritabanını kullanarak yazma işlemi esnasında kullanıcıya 8 adet alternatif kelimedenden oluşan bir tahmin listesi sunmaktadır. Tanımlanan tuş kombinasyonları yardımıyla kullanıcı tahmin listesinden bir kelime seçebilmekte ve seçilen kelime sistem tarafından otomatik olarak tamamlanmaktadır. Geliştirilen sistemin performansı tuşlama tasarrufu açısından değerlendirilmiştir. Tüm metinler arasından rastgele seçilen 15 metin ile yapılan test işleminde ortalama %50,98 tuşlama tasarrufu sağlanmıştır.

## TEXT ANALYSIS BASED WORD COMPLETION SYSTEM FOR F KEYBOARD

### Keywords

*Alternative Technology,  
Word Completion,  
Word Prediction,  
Keystroke Saving,  
F Keyboard.*

### Abstract

Word completion is an assistive technology tool that aims to reduce the number of keys that the user must press. In early studies, it generally handled as an augmentative and alternative communication tool. However, recently word completion systems have also gained importance in different fields such as mobile devices, machine translation and search engines. In this study, a word completion system based on text analysis was developed for F keyboard, Standard Turkish Keyboard. 160 texts of clerk recruitment exams performed by the Ministry of Justice were used to test the developed system due to the intensive keyboard use of the court-house employees. Words' *unigram* and *bigram* frequencies of these texts were extracted and stored in a database. By using this database, the system presents a prediction list of 8 alternative words to the user during the writing process. With the help of defined key combinations, the user can select a word from the prediction list and the selected word is completed automatically by the system. The performance of the system was evaluated in terms of keystroke saving. 50.98% of average keystroke saving rate was provided at the test process done with 15 randomly selected texts among the all texts.

### Alıntı / Cite

Karabulut, B., Ünver, H. M., (2020). F Klavye için Metin Analizi Tabanlı Kelime Tamamlama Sistemi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 262-272.

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

B. Karabulut, 0000-0003-0755-1289  
H. M. Ünver, 0000-0001-9959-8425

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	09.03.2018
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	18.06.2018
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	27.11.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: brgnkarabulut@gmail.com

## 1. Giriş (Introduction)

Kelime tamamlama, kullanıcının tuşlamaya başladığı kelimeyi olabildiğince doğru şekilde tahmin ederek kelimenin doğrudan yazılmasını sağlama işidir. Kullanıcı bir kelimeyi tuşlamaya başladığında veya hiç tuşlamadan, ekranda kelime tahminleri listelenir. Eğer doğru kelime tahmin edilirse, kullanıcının seçimi ile bu kelime doğrudan yazılır. Bu şekilde kelimenin daha az tuşlama ile yazılması sağlanır. Ancak, doğru kelime tahmin edilemezse kullanıcı tüm kelimeyi kendi yazarak tamamlar (Fazly ve Graeme, 2003; Li ve Graeme, 2005).

Kelime tamamlama ve kelime tahmin sistemleri temel olarak fiziksel engelli kişilerin yazma hızını artırmak için geliştirilmiştir (Tam ve Wells, 2009). Bu nedenle, 1980-2000 yılları arasında yapılan çalışmalarda kelime tamamlama, genellikle bir alternatif ve destekleyici iletişim aracı olarak ele alınmıştır. Ancak, 2000'li yıllardan sonra mobil cihazlarda kullanımıyla yeni bir alanda yer almaya başlamıştır. Bu günkü konumuyla kelime tamamlama birçok farklı alanda yer almaktadır. Alternatif ve destekleyici iletişim sistemleri, cep telefonları, arama motorları ve kısa mesaj servisleri için önem arz etmektedir (HaCohen-Kerner ve Greenfield, 2012). Literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak, kelime tamamlama ve tahmin sistemlerinin kullanım alanları, aşağıda belirtildiği gibi sıralanabilir.

- Alternatif ve Destekleyici İletişim (Li ve Graeme, 2005)
- Cep telefonu/Mobil Cihazlar (Van den Bosch ve Bogers, 2008)
- Kısa Mesaj Servisi(SMS) (Karunathne vd., 2013)
- Makine Çevirisi (Foster vd., 1996)
- Kişisel cep bilgisayarı(PDA) (Tam ve Wells, 2009)
- Ekran Klavyesi (Anson vd., 2006)
- Arama Motorları (HaCohen-Kerner ve Greenfield, 2012)

Geliştirilen kelime tamamlama veya kelime tahmin sistemleri değerlendirilirken farklı ölçütler kullanılmıştır. Bu ölçütler; isabet oranı (HR, Hit Rate), tuşlama tasarrufu (KS, Keystroke Saving), doğruluk (Acc, Accuracy) ve tamamlamaya kadar tuşlama (KuC, Keystroke Until Completion) olarak belirtilmiştir (Fazly ve Graeme, 2003). Ancak, kelime tahmin ve kelime tamamlama sistemlerinin performansının değerlendirilmesinde temel değerlendirme ölçütü olarak tuşlama tasarrufu kullanılmaktadır (Trnka, 2010). Kısaca KS olarak ifade edilen tuşlama tasarrufu, kullanıcının kelime tamamlama kullanarak yazarken tuş basımından elde ettiği tasarruf oranını vermektedir.

Tuşlama tasarruf oranı, Eşitlik(1) yardımıyla hesaplanmaktadır (Wandmacher ve Antoine, 2008).

$$ksr_n = \left(1 - \frac{k_p}{k_a}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

Formülde kullanılan terimler:  $ksr_n$ : Tuşlama tasarruf oranı,  $n$ : Tahmin listesinin uzunluğu,  $k_p$ : Kelime tahmin kullanarak yazarken basılan toplam tuş sayısı,  $k_a$ : Kelime tahmin olmadan yazarken basılan toplam tuş sayısı.

KS değeri arttıkça sistemin verimliliği de artmaktadır. Bu sebeple, yapılan çalışmalar genellikle bu değeri arttırmaya yönelik olmaktadır. Bunun dışında kelime tamamlama ve tahmin sistemlerinin gerçek kullanıcılar ile farklı aygıtlarda kullanımının katkılarını değerlendiren çalışmalar da bulunmaktadır (Tam ve Wells, 2009; Anson vd., 2006; Handley-More vd., 2003). Anson vd. (2006), yaptıkları çalışmada ekran klavyelerinde kelime tamamlama ve kelime tahmininin yazma hızına etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 20-38 yaş aralığında, 5 kadın ve 5 erkek katılımcı ile bir test yapılmıştır. 7 katılımcı kelime tahmini ile en hızlı yazma hızına ulaşırken, 2 katılımcı kelime tamamlama ile en hızlı yazma hızına ulaşmıştır. Sadece bir katılımcı her iki metotla da bir hız artışı elde edememiştir. Sonuç olarak bu çalışma ile kelime tamamlama ve tahmin sistemlerinin ekran klavyeleri ile kullanımlarında hız artışı sağladığı tespit edilmiştir. Tam ve Wells (2009), cep bilgisayarlarında (PDA) kelime tahmin listesi kullanımının faydalarını değerlendirmiştir. Cep bilgisayarlarında kelime tahmin aracı olarak WordQ yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada, 11-14 yaş aralığında 21 katılımcı yer almıştır. Sonuçta, cep bilgisayarında kelime tahmin listesi kullanımı ile olumlu sonuçlar elde edileceği belirtilmiştir. Belirtilen bu çalışmalar, kelime tamamlama ve tahmin kullanımının KS veya diğer formüsel değerlendirme ölçütlerinin dışında kullanıcıya sağlayacağı faydaları göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı, Türkçeye özgü bir klavye olan F klavye ile birlikte kullanılmak üzere metin bilgisinden yararlanan bir kelime tamamlama sistemi geliştirilmesidir. Öncelikle KS açısından faydalı bir sistem geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bununla birlikte dile özgü klavyenin ergonomik katkılarından ve metinlerin anlamlı bilgilerinden



yararlanarak kelime tamamlamanın faydası artırılmaya çalışılmıştır. Çalışma ile ilgili daha detaylı bilgi Karabulut (2016) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında sunulmuştur.

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Kelime tamamlama üzerine yapılan basit yöntemlere dayalı ilk çalışmalar 1980'li yıllarda başlamıştır (Fazly ve Graeme, 2003). İlk zamanlarda yapılan çalışmalar, kelime tamamlamayı genellikle bir alternatif ve destekleyici iletişim aracı olarak ele alırken son zamanlarda farklı alanlarda kullanımına yönelik çalışmalar da yapılmıştır. Foster vd. (1996), makine çevirisi için yeni bir yaklaşım sunmuşlar ve bu yaklaşımın uygunluğunu belirlemek için otomatik kelime tamamlama sistemi kullanmışlardır. Van Den Bosh ve Bogers (2008), kelime tamamlama sisteminin mobil cihazlarda kullanımı için çalışma yapmışlardır. Karunarathne vd. (2013), Sinala dili için mobil kısa mesajlarda kullanılmak üzere bir cümle tahmin sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yaklaşım sayesinde tahmin sistemi kullanılmadan mesaj yazımına kıyasla mesaj yazma süresi kısaltılmıştır. Darragh vd. (1990) kelime tahmini ile kullanıcının yazma hızını artırmak ve iletişimi kolaylaştırmak için etkileşimli klavye çalışması yapmışlardır. Bununla birlikte kelime tamamlama veya kelime tahmin sisteminin farklı aygıtlarda kullanımı üzerine çok sayıda patent çalışması bulunmaktadır (Miller, 1998; Chronqvist, 2010; Unruh, 2010; Thorn, 2010; Bower vd., 2011; Tocci, 2012).

Kelime tamamlama sistemlerinde, kullanıcıya sağlanan faydayı artırmak için farklı metotlar kullanılmıştır. Özellikle kullanılan corpus üzerinde farklı yöntemler denenerek daha doğru tahminler listelenmeye ve daha fazla tuş tasarrufu elde edilmeye çalışılmıştır.

Garay-Vitoria ve Gonzalez-Abascal (1997), cümlenin sözdizim analizine dayalı kelime tahmini üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmada geliştirilen metot, kullanıcının sözlüğüne göre kendini adapte edebilme özelliğine sahiptir. Kelime tahmini için önerilen bu yöntem ile özellikle kullanılan sözdizim analizinden dolayı sadece istatistiksel olan yöntemlerden daha iyi sonuç elde edildiği belirtilmiştir. Diğer bir çalışmada Palazuelos vd. (1998), İspanyolca için hem istatistiksel kurallar hem de gramer kurallarını uygulayan kelime tahmin sistemi üzerine çalışma yapmışlardır. Geliştirilen tahminci, sadece bir anahtar (switch) kullanılarak yazabilecek durumda olan, motor becerileri yetersiz kişilerin yazma oranını artırmak için birkaç yazılım uygulaması içermektedir. Sistemde kelime tahminin bulunması ile bu kişilerin yazma oranının 2-3 wpm (words per minute- dakika başına kelime) değerinden 8-10 wpm değerine kadar arttığı saptanmıştır. Hunnicutt ve Carlberger (2001), İsveç dili için gramer olarak daha uygun kelimeler önererek kullanıcıya daha az zihinsel yük sağlayan ve KS açısından önceki tahmincilerden iyi olan bir kelime tahmin sistemi geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Kelime tahmini için Markov modelleri ve sezgisel yaklaşımlar kullanılmıştır. Geliştirilen program testlerinde %46 KS değeri elde edilmiştir.

Fazly (2002) ve Fazly ve Graeme (2003), kelime tamamlama sisteminde sözdizim kurallarını dikkate alarak bir çalışma yapmışlardır. Kelime tamamlamada önerilen kelimelerin sözdizimsel olarak daha uygun olmasını sağlamak için sözcük türü (part-of-speech) ile n-gram bilgisini kombine eden iki algoritma sunulmuş ve test edilmiştir. Geliştirilen algoritmalarından biri ile temel algoritmalara kıyasla KS değerinde artış elde etmişlerdir. Al-Mubaid (2003), çalışmasında kelime tahmin problemi için yeni bir yaklaşım sunmuştur. Çalışmada, verilen cümle bağlamına uygun kelimeyi tahmin etmek için bir veri madenciliği aracı kullanılmıştır. Yaklaşımın, benzer metotlara kıyasla daha az eğitim metni gerektirdiği ve tahminleri %93 doğruluk oranıyla ürettiği saptanmıştır.

Li ve Graeme (2005), kelime tamamlama üzerine dikkat çeken çalışmalardan birini yapmışlardır. Çalışmada, fiziksel engelli kişiler için kullanılan kelime tamamlamaya semantik bilginin katkısı araştırılmıştır. Sadece n-gram kullanımı yerine anlamsal olarak daha uygun kelimeler tahmin etmek n-gram istatistikleri ile semantik bilgiyi kombine eden bir yaklaşım sunulmuştur. Sadece n-gram veya sadece sözcük türü bilgisini kullanan kelime tamamlama sistemlerine kıyasla önemli performans elde edilmiştir. Sistem tuş tasarrufunda %14,63 'e kadar artış sağlanmıştır. Trnka vd. (2006), kelime tahminlerini iyileştirmek için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada bir dil modeli ile konu modelleme (topic modelling) adapte eden iki metot geliştirmişlerdir. Geliştirilen metotlar kelime tahminine uygulanmış ve trigram üzerinde belirgin bir gelişme sağlanmıştır. Geliştirilen kelime tahmininde konu modelleme ile her bir kelime için basılması gereken tuş sayısı ortalama 2,5 'e düşürülmüştür. Miller ve Wolf (2006), kelime tamamlama sisteminde saklı anlam analizi (LSA, latent semantic analysis) yönteminden faydalanmışlardır. Çalışmada tuşlanan kelimenin anlamsal içeriğini modellemek için LSA kullanılarak dil bağımsız bir kelime tamamlama algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma ile %56 KS ve %42 isabet oranına ulaşılmıştır.

Al-Mubaid (2007), kelime tahmini için bağlam öznitelikleri (context features) ve makine öğrenmesi tabanlı yeni bir yaklaşım sunmuştur. Çeşitli özellik-çıkarma metotları ile yüksek ayırt edici özellikler çıkarılmış ve bunlarla kelime tahminci eğitilerek problem bir öğrenme-sınıflandırma işine dönüştürülmüştür. Test edilen sistem ile benzer çalışmalara kıyasla önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bazı testlerde doğru tahmin oranı %91 değerine

ulaşmıştır. MacKenzie ve Zhang (2008), göz ile yazmada kelime tahmininin kullanıldığı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, kelime tahmin ve harf tahmini olmak üzere iki yazma tekniği ve bir sabitleme algoritması sunulmuştur. Harf tahmini işleminde, kelime tahminine benzer şekilde muhtemel 3 harf belirlenip ekran klavyesinde görüntülenmiştir. Sonuçta, harf tahminin kelime tahmini kadar iyi hatta bazı durumlarda daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir.

Ha-CohenKerner ve Greenfield (2012), İbrani dilinde temel kelime tamamlama ve tahmin işlemleri için tuş tasarrufunu geliştirecek bir çalışma yapmışlardır. Önerilen modelde 177M kelime, morfolojik analiz, çeşitli n-gram modelleri ve diğer araçlar kullanılmıştır. Çalışmada, İbranice ve diğer diller için yapılan kelime tahmin sistemlerine göre daha yüksek tuş tasarruf oranı sağlanmıştır. Ayrıca çalışmada iki önemli sonuç elde edilmiştir. Birincisi, çalışılan dilin corpusu ne kadar büyük olursa tahminler o kadar iyi olmaktadır. İkincisi, dil modeli sadece bir corpusa dayanırsa morfolojik analiz faydalı olmaktadır. Stoop ve Van Den Bosch (2014), kelime tahmin için farklı bir bilgi kaynağı kullanan bir çalışma yapmışlardır. Sistemde, bilgi kaynağı olarak kişinin kendine özgü ve ayırt edici dil kullanımının (idiolect) yanı sıra sosyal gruplar içi dil kullanımından (sociolect) faydalanılmıştır. Çalışmada veri toplama ve test işlemleri için Twitter kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, bir dizi Soothsayer kullanıcılarında %50'den daha fazla tuş tasarrufu sağlandığı belirtilmiştir.

Belirtilen bu çalışmaların yanı sıra geliştirilmiş ve kullanımda olan paket programlar bulunmaktadır. Bu programlardan bazıları ilkokullar ve sağlık merkezlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Öne çıkanlardan bazıları WordQ (<http://www.goqsoftware.com/wordQ.php>) ve Co:Writer (<http://donjohnston.com/cowriter/>) adı verilen paket programlardır.

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

#### 3.1. F Klavye (F Keyboard)

F klavye, Türkçeye özgü geliştirilmiş olan Standart Türkçe Klavyedir. 1940'lı yıllarda Dr. İhsan Sıtkı Yener, dile özgü harf düzeninin gerekliliğini fark etmiş ve Türkçeye özgü harf düzeni oluşturma çalışmalarına başlamıştır (MEB, 2012). Bu çalışmalar ancak 1955 yılında resmi olarak desteklenmiştir. Oluşturulan bir komisyon, Türk Dil Kurumu tarafından sağlanan dil verileriyle bilimsel bir çalışma yürütmüş ve F Klavye oluşturulmuştur. Geliştirilen bu klavye ile dünya çapında yapılan yarışmalarda önemli başarılar elde edilerek dile özgü klavyenin başarımı gösterilmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen sistem bir klavye ile adapte çalışmak üzere tasarlanmıştır. Türkçe metinlerin kullanıldığı çalışmada Türkçe yazı yazmaya uygun bir klavye olan F klavyeye yer verilmiştir. Bu şekilde dile özgü klavye kullanımı ile kelime tamamlamanın sağlayacağı katkının artırılması hedeflenmiştir.

#### 3.2. Dil Verisi (Corpus)

Kelime tamamlama sistemleri, tahmin listesi oluşturabilmek için dil verisine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada gerekli kelime verilerinin, kullanıcının sisteme yükleyeceği metinlerden elde edilmesi esas alınmıştır. Bu şekilde metinlerin sağlayacağı anlamlı bilgilerin kelime tamamlama sistemine katkısını artıracığı ve gereksiz kelime verisi tutulmasını engelleyeceği düşünülmüştür.

Geliştirilen kelime tamamlama sisteminde kelime verisi oluşturma işlemi kullanıcıya bırakılmıştır. Ancak çalışmada, sistemin testi için bir çalışma alanı belirlenmiş ve bu alana ait metinlerden yararlanılmıştır. Adliyelerdeki yoğun klavye kullanımı ve sürekli benzer kelimelerle metinlerin yazılması dikkate alınmış ve adli metinler kullanılmıştır. Çalışmada, Türkiye Cumhuriyeti Adalet Bakanlığının zabıt kâtabi alım sınavlarında kullandığı 2014 ve 2015 yıllarına ait 160 metin sistemin eğitimi için kullanılmıştır (AB, 2014; AB, 2015). Yine bu metinler arasından rastgele seçilen 15 metin ile sistemin testi gerçekleştirilmiştir.

#### 3.3. Tahmin Metotları (Prediction Methods)

Kelime tamamlama sistemlerinde tahmin listesinin oluşturulması için farklı yöntemler kullanılmıştır. Ayrıca tuş tasarrufunu artırmak için farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları istatistiksel n-gram dil modelleri, sözdizimsel cümle analizi, semantik analiz, konu modelleme ve saklı anlam analizi yöntemleridir. Bu çalışmada, metin analizi işlemiyle metinlerden kelime frekans bilgileri çıkarılmış ve bu frekans bilgileri tahmin listesinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Burada kelimelerin unigram ve bigram frekans bilgilerinden yararlanılmıştır.

### 3.3.1. Unigram Frekansı (Unigram Frequency)

Kullanılan tüm metinler içerisinde, kelimelerin kullanım sayısıdır. Unigram frekans bilgileri, kullanıcının tuşlamaya başladığı kelimeyi tahmin etme işleminde kullanılmaktadır. Kullanıcının tuşladığı harflerle devam eden aday kelimelerden en yüksek frekansa sahip belirli sayıda kelime, tahmin listesinde görüntülenmektedir. Unigram frekanslarının elde edilmesinde uygulanan adımlar Şekil 1' de gösterilen algoritma da verilmiştir.

---

```

1: Girdi:  $M$ , kullanılan metin.
2: Semboller:  $kelimeleriCikar()$ , parametre olarak verilen bir metnin kelimelerinin listesini döndüren fonksiyondur,  $length()$ , verilen listenin eleman sayısını döndüren fonksiyondur,  $unigramKelimeSay()$ , parametre olarak verilen listede istenilen kelimenin frekansını bulan fonksiyondur.
3:  $T \leftarrow \emptyset$ 
4:  $unigramFrekans \leftarrow \emptyset$ 
5:  $T \leftarrow kelimeleriCikar(M)$ 
6: for  $i \leftarrow 1 \rightarrow length(T)$ 
7:   if  $T_i \notin unigramFrekans$  then
8:      $frekans \leftarrow unigramKelimeSay(T, T_i)$ 
9:      $unigramFrekans \leftarrow unigramFrekans \cup \{(T_i, frekans)\}$ 
10:  end if
11: end for
12: Çıktı:  $unigramfrekans$ 

```

---

Şekil 1. Metindeki kelimelerin unigram frekanslarının elde edilme algoritması (The algorithm of obtaining the unigram frequencies of the words in the text)

### 3.3.2. Bigram Frekansı (Bigram Frequency)

Kullanılan tüm metinler içerisinde, tüm olası kelime çiftlerin kullanım sayısıdır. Bigram frekans bilgileri, kullanıcının yazdığı bir kelimedenden sonra gelecek olan kelimenin tahmininde kullanılmaktadır. Yazılmış olan kelimedenden sonra gelebilecek olan aday kelimelerden en yüksek frekansa sahip belirli sayıda kelime, tahmin listesinde görüntülenmektedir. Bigram frekanslarının elde edilmesinde uygulanan adımlar Şekil 2' de gösterilen algoritma da verilmiştir.

---

```

1: Girdi:  $M$ , kullanılan metin.
2: Semboller:  $kelimeleriCikar()$ , parametre olarak verilen bir metni kelimelerine ayıran ve kelime listesini döndüren fonksiyondur;  $length()$ , verilen listenin eleman sayısını döndüren fonksiyondur;  $bigramKelimeSay()$ , parametre olarak verilen listede, verilen iki kelimenin ardışık olarak yer alma frekansını bulan fonksiyondur.
3:  $T \leftarrow \emptyset$ 
4:  $bigramFrekans \leftarrow \emptyset$ 
5:  $T \leftarrow kelimeleriCikar(M)$ 
6: for  $i \leftarrow 1 \rightarrow (length(T) - 1)$ 
7:   if  $\{(T_i, T_{i+1})\} \notin bigramFrekans$  then
8:      $frekans \leftarrow bigramKelimeSay(T, T_i, T_{i+1})$ 
9:      $bigramFrekans \leftarrow bigramFrekans \cup \{(T_i, T_{i+1}, frekans)\}$ 
10:  end if
11: end for
12: Çıktı:  $bigramFrekans$ 

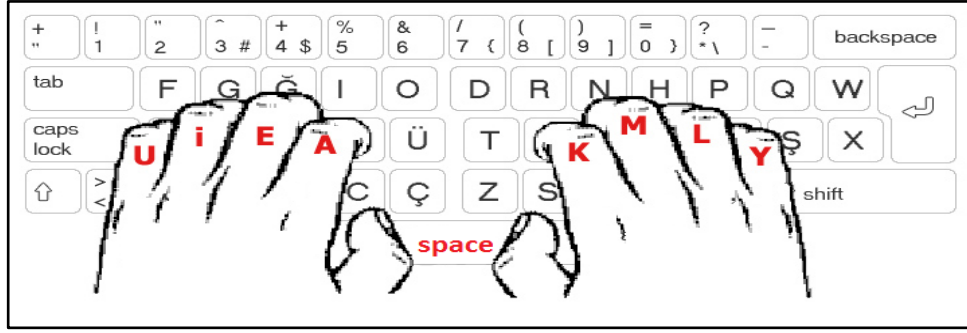
```

---

Şekil 2. Metindeki kelimelerin bigram frekanslarının elde edilme algoritması (The algorithm of obtaining the bigram frequencies of the words in the text)

### 3.4. Tahmin Listesi (Prediction List)

Tahmin listesi, kelime tamamlama sisteminde kullanıcının tuşlama bilgisine bağlı olarak sistemin kullanıcıya sunduğu aday kelimeleri barındırmaktadır. Çalışmada, kullanıcıya 8 elemanlı bir aday kelime listesi sunulmaktadır. Tahmin listesinin 8 elemanlı olması sistemin F klavye ile bütünleşik kullanımından kaynaklanmaktadır. Şekil 3 'te verildiği üzere F klavye kullanıcıları parmaklarını, klavyede orta sırasında bulunan 8 harf tuşuna konumlandırmaktadır. Bunlar sol elde U, İ, E, A harf tuşları ve sağ elde K, M, L, Y harf tuşlarıdır. Her iki elin başparmakları ise boşluk (space) tuşuna konumlanmaktadır. Bu bilgi dikkate alınarak kullanıcıya belirtilen 8 harf tuşuna karşılık gelecek olan 8 aday kelime içeren bir tahmin listesi sunulmaktadır. Tahmin listesinde bulunan kelimeler, kullanıcının tuşlamasına bağlı olarak belirlenen en yüksek frekansa sahip 8 aday kelimedir.



Şekil 3. F Klavye Parmak Konumları (Finger Positions for F Keyboard)

$i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$  ve  $F_i = i$ . tahminin frekans değeri olmak üzere tahmin listesi;  
 $F_1 \geq F_2 \geq F_3 \geq F_4 \geq F_5 \geq F_6 \geq F_7 \geq F_8$  olacak şekilde en yüksek frekansa sahip 8 kelimeyi içermektedir.

Tahmin listesi kelimeleri ekranda, 8 harf tuşu ile paralel olacak şekilde yatay olarak sıralanmaktadır. Belirlenen 8 aday kelimenin ekranda hangi sırada görüntüleneceği parmakların aktif kullanılabilme durumuna göre belirlenmiştir. Burada sağ elini yoğun kullanan klavye kullanıcıları düşünülerek buna uygun şekilde sıralamayı sağlayacak öncelik değerleri belirlenmiştir. Örneğin, tahmin listesi için ele alınacak 8 kelimedeki frekans en yüksek olan kelime, klavyede en rahat kullanıldığı düşünülen ve en yüksek öncelik atanan sağ el işaret parmağına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Tablo 1’de belirtilen bu öncelik değerleri ve tahminleri temsil eden harf tuşları verilmiştir. Tahmin listesi için ele alınan 8 kelime, ekranda bu öncelik değerlerine göre sıralanacaktır.

Tablo 1. Öncelik Sıralaması (Priority Order)

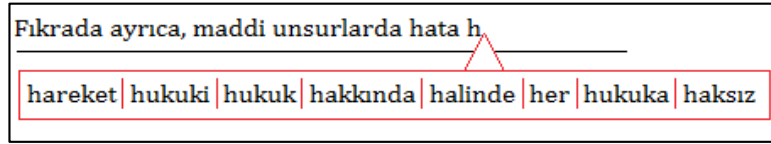
Tuş	Tahmin Frekansı ( $F_i$ )	Öncelik
K	1.tahmin ( $F_1$ )	1
M	2.tahmin ( $F_2$ )	2
A	3.tahmin ( $F_3$ )	3
E	4.tahmin ( $F_4$ )	4
L	5.tahmin ( $F_5$ )	5
Y	6.tahmin ( $F_6$ )	6
İ	7.tahmin ( $F_7$ )	7
U	8.tahmin ( $F_8$ )	8

Geliştirilen sistemin kullanımı esnasında tahminler belirtilen şekilde frekans ve öncelik değerleri temel alınarak ekranda listelenecektir. Ancak kullanıcı doğru kelimeyi tahmin listesinde gördüğünde bu kelimeyi seçebilmelidir. Bunun için bir seçim metodu belirlenmelidir. Seçim metodu için de F klavye kullanımı dikkate alınmıştır. Şekil 3 incelendiğinde 8 parmak harf tuşlarına denk gelirken başparmakların space tuşuna basmakla görevli olduğu görülmektedir. Parmakların bu konum bilgileri kullanılarak seçim işlemi için ikili tuş kombinasyonları belirlenmiştir. Belirtilen 8 harf tuşunun temsil ettiği tahminlerden seçim yapabilmek için space tuşu ile ilgili harf tuşuna birlikte basılmalıdır. Tablo 2’de belirtilen tuş kombinasyonları verilmiştir.

Tablo 2. Tuş Kombinasyonları (Key Combinations)

Tahmin (Frekans- $F_i$ )	Tuş Kombinasyonu
1.tahmin( $F_1$ )	Space + K
2.tahmin ( $F_2$ )	Space + M
3.tahmin ( $F_3$ )	Space + A
4.tahmin ( $F_4$ )	Space + E
5.tahmin ( $F_5$ )	Space + L
6.tahmin ( $F_6$ )	Space + Y
7.tahmin ( $F_7$ )	Space + İ
8.tahmin ( $F_8$ )	Space + U

**Örnek:** Şekil 4’te kelime tahmin listesi oluşturulması ve bu listeden kelime seçimine örnek verilmiştir.



Şekil 4. Kelime Tahmin Listesi Örneği (An Example Prediction List)

Yukarıda yazılmakta olan kelime için 8 kelime tahmini yatay olarak verilmiştir. Bu kelimelerin frekans sıralaması şu şekildedir;

$$F_{halinde} \geq F_{her} \geq F_{hakkında} \geq F_{hukuk} \geq F_{hukuka} \geq F_{haksız} \geq F_{hukuki} \geq F_{hareket}$$

Kullanıcı, burada görülen kelimelerden birini seçebilmek için aşağıda belirtilen tuş kombinasyonlarından ilgili olanını kullanmalıdır.

"halinde"	→ Space + K
"her"	→ Space + M
"hakkında"	→ Space + A
"hukuk"	→ Space + E
"hukuka"	→ Space + L
"haksız"	→ Space + Y
"hukuki"	→ Space + İ
"hareket"	→ Space + U

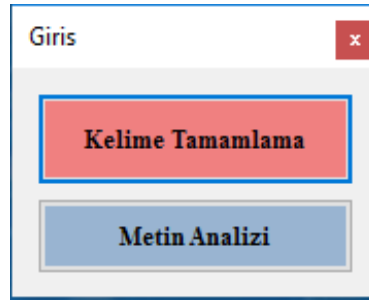
### 3.5. Programlama Dili ve Veri Tabanı (Programming Language and Database)

Çalışmada öngörülen kelime tamamlama sisteminin geliştirilmesi için bir uygulama geliştirme platformu, programlama dili ve veritabanı belirlenmiştir. Bu aşamada görsel programlamaya uygun bir platform ve hızlı sorgu yapılabilen bir veritabanı seçilmeye çalışılmıştır. Sistem, Visual Studio 2013 uygulama geliştirme platformunda, C# programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Kelime verilerinin tutulması ve gerektiğinde erişilmesi için MySql veritabanı kullanılmıştır.

### 4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

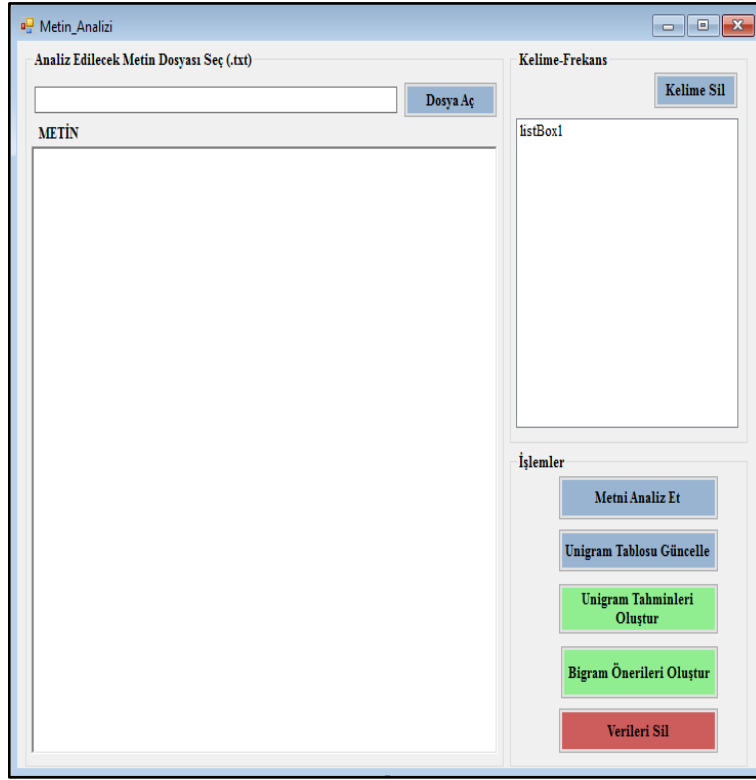
Materyal ve Yöntem bölümünde detaylı olarak belirtilen araçlar kullanılarak öngörülen kelime tamamlama sistemi geliştirilmiştir. Sistemde Giriş, Metin Analizi ve Kelime Tamamlama olmak üzere 3 arayüz bulunmaktadır.

**Giriş Arayüzü:** Bu arayüzde bulunan iki buton ile kullanıcının seçim yapmasına olanak sağlanmıştır. Kullanıcı kendi metinlerini kullanarak kelime veritabanını oluşturmak için metin analizi butonunu ve kelime tamamlama işlemini başlatmak için ise kelime tamamlama butonunu kullanır. (Şekil 5)



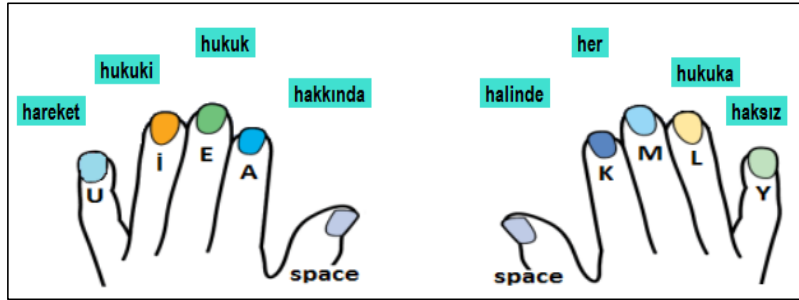
Şekil 5. Giriş arayüzü (Main Interface)

**Metin Analizi Arayüzü:** Bu arayüz kullanıcının istediği metinleri analiz ederek veritabanını oluşturmasına olanak sağlamaktadır. (Şekil 6) Sistemde kullanılmak üzere txt uzantılı dosyada bulunan metinler seçilebilmektedir. Arayüz ile seçilen metinlerdeki kelimelerin unigram ve bigram frekans bilgileri çıkarılır ve bu bilgiler veritabanında ilgili tablolara aktarılır. Ayrıca kullanıcı istemediği kelimeleri veritabanına aktarılmadan silbilmektedir.



Şekil 6. Metin Analizi Arayüzü (Text Analysis Interface)

**Kelime Tamamlama Arayüzü:** Bu arayüzde kelime tahminleri listelenmektedir. Arayüz imleç takibi ile konumunu kullanıcının odaklandığı noktaya göre ayarlamaktadır. Bununla birlikte klavye dinlemesi ile kullanıcının tuşlamaları takip edilmekte ve uygun tahminler yatay olarak listelenmektedir (Şekil 7).

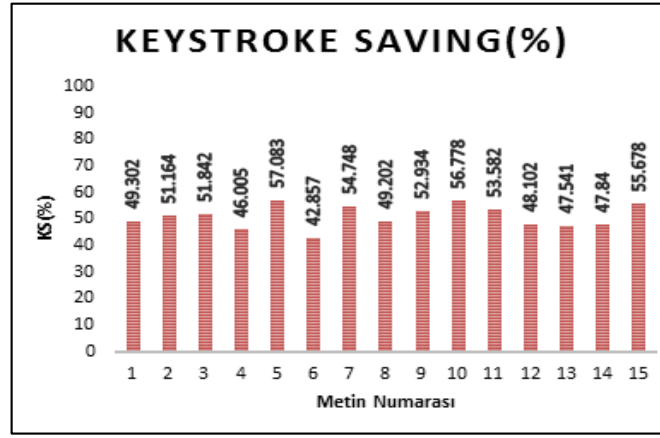


Şekil 7. Kelime Tamamlama Arayüzü (Word Completion Interface)

Kelime tamamlama arayüzüne kelime seçimi için gerekli tuş kombinasyonları eklenmiştir. Materyal ve Yöntem kısmında detaylı olarak verilen tuş kombinasyonlarından ilgi olanı kullanarak kelime seçimi yapılabilmektedir. Seçilen kelime doğrudan yazılarak tamamlanmaktadır.

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

**Tuşlama Tasarrufu- KS:** Geliştirilen sistemin testi için 160 metin üzerinde metin analizi işlemi yapılmış ve bu şekilde sistemin kullanımı için gerekli kelime verileri sağlanmıştır. Sistem, benzer çalışmaların değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan ve sistemin kullanıcıya sağladığı tuş tasarrufunu ölçen KS açısından değerlendirilmiştir. Bu işlem için kullanılan 160 metin arasından rastgele 15 metin seçilmiştir. Bu metinlerin her biri için sistemin sağladığı tuş tasarruf oranı hesaplanmıştır. Hesaplanan bu oranlar Şekil 8' de grafiksel olarak verilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar değerlendirildiğinde 57% değerine ulaşabilen tuş tasarrufu sağlanabildiği görülmüştür. Genel olarak değerlendirildiğinde ise 15 metin için ortalama 50,97% oranında tuş tasarrufu sağlanmıştır. Bu da tuş basımının neredeyse yarı yarıya azaltılabileceğini göstermektedir.



Şekil 8. Tuşlama Tasarrufu Oranları (Keystroke Saving Rates)

**Tahmin Listesi Eleman Sayısı:** Mevcut çalışmalar incelendiğinde, tahmin listesinin genellikle 5 elemanlı olduğu görülmüştür. Bazı çalışmalarda, tahmin listesi eleman sayısının fazla olmasının, kullanıcının daha geniş alana bakmasını gerektirerek harcanacak olan zihinsel çabayı artırabileceği belirtilmiştir. Ancak bu çalışmada, kullanıcının tuşlamasına bağlı olarak frekansı yüksek kelimeler işaret parmaklarına doğru, yani tahmin listesinin ortasına doğru kaymaktadır. Bu özellik, kelimenin kullanıcının görüş alanına girmesini sağlamaktadır. Kullanıcı, 8 elemanlı tahmin listesinin tamamına bakmadığında bile tuşlanmakta olan kelime, tuşlamaya bağlı olarak orta noktaya doğru kaymaktadır. Ayrıca sisteme eklenen imleç takibi özelliği ile tahmin listesi imlecin konumuna göre ilerlemekte ve her durumda kullanıcının görüş alanında bulunmaktadır. Bu şekilde tahmin listesi eleman sayısının fazla olmasından kaynaklanabilecek problemler azaltılmaya çalışılmıştır.

**Tahmin Listesinden Kelime Seçimi:** Geliştirilen sistemde, kullanıcının tahmin listesinden kelime seçme işlemi daha kolay yapmasını sağlamak için harf tuşları ve boşluk tuşunun kombinasyonlarının kullanıldığı yeni bir seçim yöntemi oluşturulmuştur. Mevcut çalışmalardan farklı olarak bu kombinasyonlar ile kullanıcı, klavyede yazarken parmaklarını harflerden uzaklaştırmadan ve dikkatini tuş arama ile dağıtmadan seçim işlemi yapabilecektir. Ayrıca belirlenen bu tuş kombinasyonları özellikle normal kullanıcılar için zamanla öğrenilebilir niteliktedir. Kullanıcı bir süre sonra klavyeye bakmadan kolaylıkla seçim işlemi yapabilecektir. Bu şekilde kelime tamamlama sisteminin kullanımında önemli bir kolaylık sağlanacağı öngörülmektedir.

Geliştirilen sistemde tahmin listesi elemanları, yatay olarak sıralanmaktadır. Bu yatay sıralama oluşturulurken parmakların aktif kullanım durumları dikkate alınmıştır. Frekansı yüksek kelime daha rahat kullanılan parmak ile eşleştirilmiştir. Bu da tahmin listesinden kelime seçim işlemi kolaylaştırması beklenen bir diğer faktördür.

**Metin Bilgisi Kullanımı:** Yapılan çalışmalarda genellikle doğrudan dile ait sözlükler kullanılmıştır. Bunun dışında metin bilgilerinden veya Twitter gibi sosyal medya verilerinden yararlanan çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmada metin bilgisinden yararlanılması esas alınmıştır. Kişilerin normal hayatta ve çalışma hayatında kullandıkları kelimeler, sözlük kelimeleriyle kıyaslandığında daha dar bir çerçevede ve genellikle benzer kelimelerdir. Ayrıca sıklıkla benzer metinler yazılmaktadır. Bu durumda, kullanılacak olan kelime tamamlama sisteminin genel sözlükler yerine yazılan metinlerden elde edilecek olan anlamlı kelime bilgilerini kullanmasının daha uygun bir yaklaşım olacağı düşünülmüş ve çalışmada metinlerden faydalanılmıştır. Bu şekilde daha az ve daha anlamlı kelime verisi ile verimli bir kelime tamamlama sistemi geliştirilebileceği öngörülmüştür.

Türkçe sondan eklemeli bir dildir ve metinlerde kelimeler genellikle aldıkları eklerle birlikte bulunmaktadır. Kelime tamamlama sisteminde temel amaç olabildiğince tuş tasarrufu sağlamaktır. Bu sebeple metinlerden çıkarılan kelimeler ekleriyle birlikte tutulmuştur. Bunun sistemin sağlayacağı tuş tasarrufunu artırması beklenmektedir.

**Kelime Tahmin Yöntemi:** Yapılan çalışmalarda kelime tahminlerini oluşturmak için kullanılan yöntemlerden bazıları kelime frekans bilgisi, semantik analiz, istatistiksel n-gram dil modelleri ve sözdizimsel analiz yöntemidir. Bu çalışmada, tahminlerin belirlenmesi için basit bir yöntem olan kelimelerin unigram ve bigram frekansları kullanılmıştır. Çalışmada alana veya kişiye özgü metinlerin gerekli anlamsal bilgiyi taşıdığı düşünülmüş ve bu sebeple karmaşık yöntemlerden kaçınılmıştır. Sonuçta, geliştirilen sistem ile kayda değer bir tuş tasarruf oranı elde edilmiştir. Bu oran belirtilen yaklaşımın uygunluğunu doğrular niteliktedir.

Sonuç olarak, hem alternatif ve destekleyici iletişim aracı olarak fiziksel, zihinsel veya öğrenme engelli kullanıcılar hem de normal klavye kullanıcıları için Türkçe yazı yazmaya uygun, metin bilgisinden faydalanan ve dile özgü



klavye olan F klavye ile birlikte çalışan bir kelime tamamlama sistemi geliştirilmiştir. Sistem yaklaşık **50%** tuşlama tasarrufu oranı ile başarılı bir performans göstermiştir. Bunun dışında mevcut çalışmalardan farklı olarak dile özgü klavye ile adapte edilmesi yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Metin bilgisi kullanımı ile kişiye veya çalışma alanına göre özelleşebilen bir tasarım sunulmuştur. Gelecek çalışmalarda, sistemin aktif kullanımı esnasında da kelimelerle ilgili bilgi toplaması sağlanarak tasarım kullanıcı etkileşimli hale getirilebilir. Bunun yanı sıra kullanıcı görüşleri dikkate alınarak sistem yapılandırılabilir.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

### Kaynaklar (References)

- AB, 2014. Adalet Bakanlığı, Zabıt Kâtipliği Uygulama Sınavı Metinlerine İlişkin Duyuru, <http://www.pgm.adalet.gov.tr/duyuru/2014/eylul/zbt.htm> (Erişim Tarihi: 20.07.2015)
- AB, 2015. Adalet Bakanlığı, Zabıt Kâtipliği Uygulama Sınavı Metinlerine İlişkin Duyuru <http://www.pgm.adalet.gov.tr/duyuru/2015/subat/metin.htm> (Erişim Tarihi: 20.07.2015)
- Al-Mubaid, H., 2003. Context-based word prediction and classification. In: Proceedings of the 18th International Conference on Computers and their Applications CATA'2003, Hawaii-USA, 384-388.
- Al-Mubaid, H., 2007. A Learning-Classification Based Approach for Word Prediction. *Int. Arab J. Inf. Technol*, 4, 264-271.
- Anson, D., Moist, P., Przywara, M., Wells, H., Saylor, H. and Maxime, H., 2006. The effects of word completion and word prediction on typing rates using on-screen keyboards. *Assistive technology*, 18, 146-154.
- Bower, J., Furuuchi, K., Liu, S., Morimoto, K., Robbins, D., Laughlin, C. and Davis, P., 2011. Context based word prediction. U.S. Patent No. 7,912,700.
- Chronqvist, F. A., 2010. Electronic device with text prediction function and method. U.S. Patent No. 12/363,799.
- Darragh, J. J., Witten, I. H. and James, M. L., 1990. The reactive keyboard: A predictive typing aid. *Computer*, 23, 41-49.
- Fazly, A., 2002. The use of syntax in word completion utilities. MSc Thesis, University of Toronto, Canada.
- Fazly, A. and Graeme, H., 2003. Testing the efficacy of part-of-speech information in word completion. In: Proceedings of the 2003 EACL Workshop on Language Modelling for Text Entry Methods. Association for Computational Linguistics, Budapest-Hungary, 9-16.
- Foster, G., Isabelle, P. and Plamondon, P., 1996. Word completion: A first step toward target-text mediated IMT. In: Proceedings of the 16th conference on Computational Linguistics- Association for Computational Linguistics., 1, 394-399.
- Garay-Vitoria, N. and Gonzalez-Abascal, J., 1997. Intelligent word-prediction to enhance text input rate (a syntactic analysis-based word-prediction aid for people with severe motor and speech disability). In: Proceedings of the 2nd international conference on intelligent user interfaces, New York-USA, 241-244.
- Handley-More, D., Deitz, J., Billingsley, F. F., & Coggins, T. E., 2003. Facilitating written work using computer word processing and word prediction. *American Journal of Occupational Therapy*. 57 (2): 139-151.
- HaCohen-Kerner, Y. and Greenfield, I., 2012. Basic word completion and prediction for Hebrew. In *String Processing and Information Retrieval*, Springer Berlin Heidelberg, 237-244.
- Hunnicut, S., and Carlberger, J., 2001. Improving word prediction using Markov models and heuristic methods. *Augmentative and Alternative Communication*, 17, 255-264.
- Karabulut, B., 2016. F Klavye için Metin Analizi Tabanlı Kelime Tamamlama Sistemi Tasarımı. MSc Thesis, University of Kırıkkale, Turkey.
- Karunarathne, M. S., Nanayakkara, L. D. J. F. and Ponnampereuma, K., 2013. Sentence prediction on SMS in Sinhala language. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3, 392.
- Li, J. and Graeme, H., 2005. Semantic knowledge in word completion. In: Proceedings of the 7th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility, ACM, Baltimore-USA, 121-128.
- Miller, J. W., 1998. Word prediction system. U.S. Patent No. 5,805,911.
- MacKenzie, I. S. and Zhang, X., 2008. Eye typing using word and letter prediction and a fixation algorithm. In: Proceedings of the 2008 symposium on Eye tracking research & applications, Savannah-Georgia, 55-58.
- MEB, 2012. Millî Eğitim Bakanlığı, Hızlı Yazma, [http://kozanhem.meb.k12.tr/meb\\_iys\\_dosyalar/01/11/113116/dosyalar/2012\\_12/05104825\\_hzlyazadaletmegep.pdf](http://kozanhem.meb.k12.tr/meb_iys_dosyalar/01/11/113116/dosyalar/2012_12/05104825_hzlyazadaletmegep.pdf) (Erişim Tarihi: 06.09.2015)
- Miller, T. and Wolf, E., 2006. Word completion with latent semantic analysis. In *Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006. 18th International Conference on Pattern Recognition, IEEE, Hong Kong-China*, 1252-1255.
- Palazuelos, S. E., Aguilera, S., Rodrigo, J. and Godino-Llorente, J. I., 1998. Grammatical and statistical word prediction system for Spanish integrated in an aid for people with disabilities. In *ICSLP, Sydney-Australia*.
- Stoop, W., van den Bosch, A. P. J., 2014. Using idiolects and sociolects to improve word prediction. Proceedings of the 14th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics, Gothenburg-Sweden, 318-327.
- Tam, C., and Wells, D., 2009. Evaluating the benefits of displaying word prediction lists on a personal digital assistant at the keyboard level. *Assistive technology*, 21, 105-114.
- Tocci, M., 2012. Predictive word completion, U.S. Patent No. 13/162,319.
- Thorn, O. K., 2010. Word prediction. U.S. Patent No. 7,698,326.
- Trnka, K., Yarrington, D., McCoy, K. and Pennington, C., 2006. Topic modelling in fringe word prediction for AAC. In: Proceedings of the 11th international conference on intelligent user interfaces, Sydney-Australia, 276-278.

- Trnka, K., 2010. Word prediction techniques for user adaptation and sparse data mitigation. PhD Thesis, University of Delaware, USA.
- Unruh, E., 2010. Text entry with word prediction, completion, or correction supplemented by search of shared corpus. U.S. Patent No. 12/943,856.
- Van den Bosch, A. and Bogers, T., 2008. Efficient context-sensitive word completion for mobile devices. In: Proceedings of the 10th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services ACM, 465-470.
- Wandmacher, T., & Antoine, J. Y., 2008. Methods to integrate a language model with semantic information for a word prediction component. arXiv preprint arXiv:0801.4716.



## LEAGUE CHAMPIONSHIP ALGORITHM FOR LAYER MODULI ESTIMATION OF FULL-DEPTH ASPHALT PAVEMENTS

Onur PEKCAN\*

Middle East Technical University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ankara, TURKEY

### Keywords

*Flexible Pavement,  
Backcalculation,  
League Championship  
Algorithm,  
Artificial Neural Network.*

### Abstract

This study proposes a backcalculation tool, based on the hybrid use of League Championship Algorithm (LCA) and Artificial Neural Network (ANN), in order to predict the stiffness related layer properties of full-depth asphalt pavements. The proposed algorithm, namely LCA-ANN, is composed of two main parts; (i) an ANN forward response model, which is developed with the nonlinear finite element solution, for computing the surface deflections, and (ii) LCA search algorithm which is employed to search and provide the best set of layer moduli to the ANN model. In order to evaluate the performance of the proposed method, a synthetically generated dataset and real field data are utilized. Moreover, to assess the searching ability of LCA, well-accepted metaheuristic algorithms; Simple Genetic Algorithm (SGA) and Particle Swarm Optimization (PSO) are employed for comparison purposes. Obtained results reveal that the proposed algorithm can predict the layer properties with a low order of error values and enables fast and reliable tool for backcalculation studies.

## TAM DERİNLİKLİ ESNEK ÜSTYAPILARIN KATMAN ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİ İÇİN LİG ŞAMPİYONASI ALGORİTMASI

### Anahtar Kelimeler

*Esnek Yol Kaplaması,  
Geri Hesaplama,  
Lig Şampiyonası Algoritması,  
Yapay Sinir Ağları.*

### Öz

Bu çalışma tam derinlikli esnek üstyapıların katman özelliklerinin tahmin edilmesinde kullanılacak, Lig Şampiyonası Algoritması (LCA) ve Yapay Sinir Ağları (ANN) tabanlı bir geri hesaplama algoritması önermektedir. LCA-ANN adı verilen bu algoritma iki ana bölümden oluşmaktadır: (i) yol yüzeyindeki deplasmanların hesaplandığı, lineer olmayan sonlu elemanlar çözümleri ile geliştirilen, ANN ileri hesaplama modeli ve (ii) ANN modeline girdi olarak verilecek en uygun katman elastisite modüllerinin belirlenmesinde kullanılan LCA arama algoritmasıdır. Önerilen yönetimin performansını değerlendirmek amacıyla sentetik olarak üretilen veri seti ile gerçek bir veri seti kullanılmıştır. Ayrıca, LCA'nın arama yeteğini değerlendirmek için, kabul görmüş algoritmalar olan Basit Genetik Algoritma (SGA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki önerilen algoritma düşük hata miktarlarıyla esnek üstyapı katman özellikleri tahmin edebilmekte ve geri hesaplama çalışmalarında hızlı ve güvenilir bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır.

### Alıntı / Cite

Pekcan, O., (2020). League Championship Algorithm for Layer Moduli Estimation of Full-Depth Asphalt Pavements, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(1), 273-284.

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

O. Pekcan, 0000-0003-3603-5929

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	24.02.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	04.03.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	16.03.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

\*Corresponding author: opekcan@metu.edu.tr, +90-312-210-5403

## 1. Introduction

The current structural condition of in-service pavements should be monitored routinely to decide about the maintenance and rehabilitation needs of road networks. Falling Weight Deflectometer (FWD), which is nondestructive test equipment, has been used for decades to assess the layer stiffness properties which are associated with pavement structural capacity. FWD is a device that produces an impact on the pavement surface through a falling mass and collects displacement data, named deflection basin, using the sensors placed at load application point and several locations away from it. The prediction process of pavement layer moduli from the measured deflections is called pavement backcalculation. Generally, in this process, a numerical model of the pavement section is generated and deflections are calculated theoretically under the same loading conditions of FWD. After that, the most representative layer moduli of the real pavement section is searched by trying to minimize the error between the experimental deflections and calculated ones.

Since pavement layer backcalculation is an ill-posed inverse engineering problem, its solution is complicated, and therefore, there have been several studies performed to reduce the complexity of the solution. A typical backcalculation method incorporates a theoretical pavement analysis component, namely the forward response model, where the pavement is numerically modeled, and deflections are calculated. In some of the conventional backcalculation studies and commercial computer programs, layered elastic theory (LET) is utilized as the forward response model (Scullion et al., 1990; Zhou et al., 1990; Reddy et al., 2004; Kim and Im, 2005). Since LET assumes that all the layers are linearly elastic, homogeneous and isotropic, it provides calculation simplicity. However, taking into account the linearity for the layers of which present nonlinear behavior actually may produce erroneous deflection computation despite the provided advantages of LET analysis. For this reason, researchers utilized the finite element method (FEM) for response calculations by regarding nonlinearity for the pavement geomaterials, which result in more realistic deflections. On the other hand, time-consuming analysis stages of finite element (FE) analysis make the forward response calculation impractical. Therefore, Artificial Neural Networks (ANNs) emerge as a powerful tool due to their ability to establishing a nonlinear relationship between input and output pairs within a short period. Thanks to these advantages of ANNs, they have been successfully implemented in several studies of different branches in civil engineering (Baltacıoğlu et al., 2010; Keskin and Taylan, 2010; Katanalp et al., 2019). In the pavement backcalculation area, researchers replaced computationally expensive FE forward response models with the ANN models for decades in several studies (Goktepe et al., 2006). Initial backcalculation studies of which estimate layer moduli and thickness proved the high potential of ANNs in the pavement engineering area (Meier and Rix, 1994; Meier, 1995; Saltan et al., 2002). Researchers utilized ANN as the surrogate model for both linear (Rakesh et al., 2006; Saltan et al., 2013) and nonlinear (Ceylan et al., 2005; Li and Wang, 2019) FE based forward analysis of pavement geomaterials to backcalculate the layer properties layer moduli, thickness, and Poisson ratio. In this way, more accurate and faster solutions comparing to the LET and FEM based forward analysis methods would be possible.

Another component of a typical backcalculation algorithm is the optimization algorithm which is utilized to search for the layer stiffness properties. Here, the optimization method tries to minimize the error between experimental deflections and calculated ones with the forward response model by seeking the set of layer properties and providing them to the forward model iteratively. In conventional studies, researchers used database search and least-squares methods as the search approach (Uzan et al., 1988; Sivaneswaran et al., 1991). Since backcalculation problems have stochastic nature, these methods provide limited solutions because of trapping the local optimum solutions and dependence on the initial layer moduli (Sharma and Das, 2008). To overcome such limitations, bio-inspired metaheuristic optimization methods have been successfully utilized as the search approach thanks to their competence for handling complex search spaces and independence to the seed moduli. Among the metaheuristic methods, Genetic Algorithms (GAs) are the widely applied one in all kinds of backcalculation studies such as linear and nonlinear material considerations with static and dynamic analysis of the FWD test (Rakesh et al., 2006; Hu et al., 2007; Sangghaleh et al., 2014). Bio-inspired metaheuristic search techniques mimic the different types of phenomena in nature, and therefore, their approach to solving the problems are distinctive. For this reason, the application of any other method as the search technique can contribute to the accuracy of the solution of the backcalculation problems. Apart from GAs, particle swarm optimization (PSO) (Gopalakrishnan, 2009; Öcal, 2014), differential evolution (DE) (Gopalakrishnan and Khaitan, 2010), gravitational search algorithm (GSA) (Öcal, 2014), shuffled complex evolution (SCE) (Gopalakrishnan, 2009), and levy ant colony optimization (ACO<sub>RL</sub>) (Fileccia Scimemi et al., 2016) have been successfully employed in the searching phase of the backcalculation algorithms.

In this study, a backcalculation model developed with a novel metaheuristic optimization method, league championship algorithm (LCA), and ANN forward response model is proposed. Within the scope of the study, full-depth asphalt pavement (FDP) is taken into account for backcalculation. The performance of the proposed method,

namely LCA-ANN, is investigated against the well-known metaheuristic methods PSO and a simple genetic algorithm (SGA) by analyzing the synthetically generated and field data, respectively.

## 2. Material and Method

The development stages of the proposed backcalculation algorithm consist of three main stages. In the first one, the FE model of full-depth asphalt pavement is created, and the FWD test is simulated mathematically in order to calculate the surface deflections. In the second part, ANN forward response model is trained through the solutions of the FE mechanical model. By this way, the FE model is replaced with ANN to calculate the deflections with high accuracy and quickly. In the last part, LCA is developed as the searching technique and embedded in the ANN model to supply the input data of ANN. In the following subsections, the details of the proposed LCA-ANN backcalculation algorithm is explained in detail.

### 2.1. Material Characterization of Full-Depth Asphalt Pavements

Full-depth asphalt pavements are made up of one or more layers of hot mixed asphalt material placed over the subgrade (Huang, 2003). In this study, only the FDP pavements constructed over the fine-grained subgrade is considered. Unlike conventional studies, this study takes into account the nonlinear stress softening behavior of fine-grained geomaterials. To define this behavior in the FE modeling stage, the bilinear or arithmetic model will be utilized (Thompson and Robnett, 1979). In this constitutive model, the resilient modulus of the material is decreased under the condition of increasing stress levels. The mathematical expression of the model is given in Equation 1. According to (Thompson and Robnett, 1979),  $E_{Ri}$  referring to the breakpoint resilient modulus is the best indicator of the material behavior comparing to other parameters, and therefore, the parameter is used to characterize subgrade material.

$$\begin{aligned} M_R &= E_{Ri} + K_3(\sigma_{di} - \sigma_d) \text{ when } \sigma_D \leq \sigma_{di} \\ M_R &= E_{Ri} + K_4(\sigma_d - \sigma_{di}) \text{ when } \sigma_D \geq \sigma_{di} \end{aligned} \quad (1)$$

where  $M_R$  corresponds to the resilient modulus,  $K_3$  and  $K_4$  are the coefficients calculated from the laboratory experiments,  $\sigma_D$  is the deviator stress, and  $\sigma_{di}$  refers to the breakpoint deviator stress, respectively.

For the ease of calculation, the asphalt layer is assumed as presenting the linear elastic material behavior, and it is characterized by the elastic moduli,  $E_{AC}$ . To cover the mostly encountered pavement geomaterial properties in the field, the range of the layer properties considered in the analysis is selected, as presented in Table 1.

**Table 1.** Range of the Layer Properties

LAYER	THICKNESS RANGE (mm)	MODULI RANGE (MPa)	POISSON'S RATIO
Asphalt	127 - 635	689 - 13780	0.35
Subgrade	7620- $t_{AC}$	6.9 - 96.5	0.45

### 2.2. Finite Element Modeling of Full-Depth Asphalt Pavements

FDP sections are modeled with the 2D axisymmetric ILLI-PAVE FE pavement analysis and design software. The total analysis depth of the FDP model is adjusted to 7620 mm (300 in.), and the thickness of the subgrade is calculated by subtracting the thickness of the asphalt layer,  $t_{AC}$  from the total depth. Since the deflection data at the exact locations, where the FWD sensors are available, are required to be computed, the horizontal spacing of the FE mesh is arranged according to the FWD sensor coordinates. Selected geometry of the FE domain enables us to calculate the deflections at the FWD impact locations and at the sensors placed 305 mm (12 in.), 610 mm (24 in.), and 914 mm (36 in.) away from the load application. The deflections measured at these locations are depicted with  $D_0$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{24}$ , and  $D_{36}$ , respectively. Although the FWD tests can be performed for different load levels, in this study, 40 kN load acting on a circular plate and resulting in 552 kPa uniform pressure over the pavement is defined to the FE model since it simulates an equivalent single axle load.

Through the analysis of the developed FE FDP model, a database is generated with the numerous combinations of material properties given in Table 1. From these analyses, the pairs of  $t_{AC}$ ,  $E_{AC}$ , and  $E_{Ri}$  and their corresponded deflections  $D_0$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{24}$ , and  $D_{36}$  are incorporated for the generation of ANN forward response model.

### 2.3. Artificial Neural Network Forward Response Model

ANNs are the soft computing methods that are inspired by the neural system of brains. They are able to learn and mimic the process of a system using its inputs and outputs. In the complex, nonlinear problems, ANNs can successfully establish the relationship between input and output variables. An ANN is composed of interconnected layer groups named input, hidden and output, and each of them includes several neurons (Gurney, 2005). The neurons take and process the information from the previous layer's neurons and transmit them to the consecutive neurons by considering the weight of each neuron and connection that is adjusted throughout the learning process.

In this study, a back-propagation type multilayer feed-forward neural network model is utilized. The dataset generated with the FE model is employed in the training phase of the ANN. Since it is a forward response model, inputs of ANN are  $t_{AC}$ ,  $E_{AC}$ , and  $E_{Ri}$ , while the outputs are  $D_0$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{24}$ , and  $D_{36}$ . Thus, the input and output layers consist of 3 and 4 neurons, respectively. On the other hand, two hidden layers with 60 neurons at each one are also adjusted. The trained ANN forward response model is depicted in Figure 1.

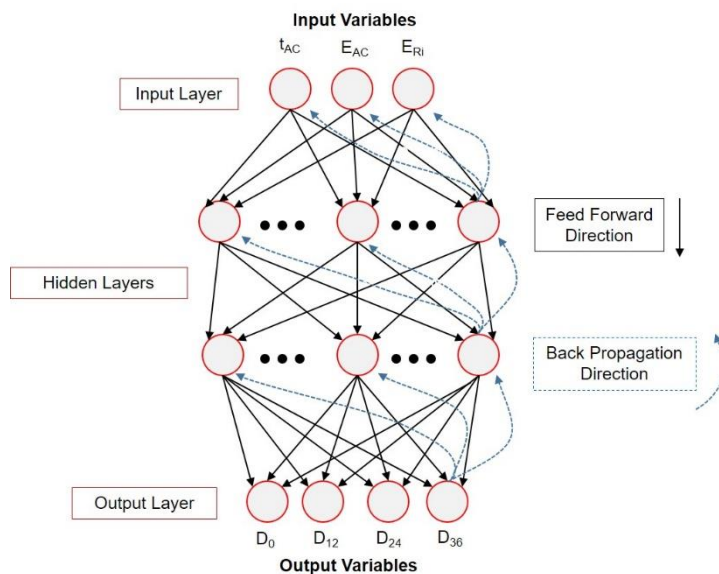


Figure 1. ANN forward response model

### 2.4. Search Method: League Championship Algorithm (LCA)

LCA is a population-based metaheuristic optimization algorithm proposed in 2009 (Kashan, 2009). As the name of the algorithm implies that LCA is developed by inspiring the competition between teams in a sports league. According to the method, the teams in the league are the individuals or agents in the population. As it is in other population-based metaheuristic techniques, teams are possible solutions of the problem that is being solved, and they are evolved throughout the iterations in order to approach the optimum solution. According to the league schedule, each team competes with the rest of the teams along with the weeks that refer to the number of iterations in the algorithmic implementation. The results of the competition are determined either win or loss based on teams' playing strength of which means to the teams' fitness value. Finally, in conformity with the performance of the teams in the current week, the new formation of each team is arranged through different mutation strategies for the following week's competitions, and the contest continues for previously defined number seasons (Kashan, 2014). The main stages of LCA together with their mathematical representations are explained below.

The number of players in each team,  $n$  is determined by the number of variables in the problem. The size of the league is expressed with the  $L$  number of teams competing with each other during the  $S \times (L - 1)$  weeks, where  $S$  refers to the number of seasons. LCA starts with the random initialization of the teams. The formation of the  $i$ th team at the week  $t$  is denoted with the vector  $X_i^t$  as in Equation 2.

$$X_i^t = (x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{in}^t) \quad (2)$$

Following that the playing strength of team  $i$ , which is expressed as  $f(X_i^t)$ , is evaluated through an objective function. On the other hand, the best formation of team  $i$ ,  $B_i^t$  until week  $t$  is found by checking the previously experienced playing strength of the team. After that the best value of the playing strength,  $\hat{f}$  up to the week for the whole league is determined for a minimization problem as given in Equation 4.

$$B_i^t = (b_{i1}^t, b_{i2}^t, \dots, b_{in}^t) \quad (3)$$

$$\hat{f} = \min_{i=1, \dots, L} \{f(B_i^t)\} \quad (4)$$

The next stage is the generation of the league schedule, where teams are matched in pairs for the course of the weeks. The algorithm utilizes a single round-robin schedule, which means that only one match is performed between two teams. After that, competition between teams is performed and winner/loser teams are determined. It should be noted that tie conditions are not considered. In order to decide the winning team, firstly, the probability of beating its rival for each team is computed. Within this respect, assuming that team  $i$  and  $j$  are playing for the week  $t$ , the beating probability of team  $i$ ,  $p_i^t$  is calculated with Equation 5. Then, a random number within the interval of  $[0,1]$  is generated and if this number is less than or equal to  $p_i^t$ , team  $i$  is marked as the winner; otherwise, team  $j$  becomes the winner of the match.

$$p_i^t = \frac{f(X_j^t) - \hat{f}}{f(X_j^t) + f(X_i^t) - 2\hat{f}} \quad (5)$$

For the following week's matches, each team goes through a revision process by evaluating the previous week's performance of the teams. In order to decide about the revision in a team, both the previous week's performance of the team and its following opponents are analyzed in an artificial manner by simulating the strengths/weaknesses/opportunities/threats of the teams, which is also known as SWOT analysis (Kashan, 2014). Here, strengths and weaknesses are considered the internal performance evaluation of a team, while the opportunities and threats are the external performance evaluation of its opponents. This revision process can be considered the update of an individual for the following iteration of a typical population-based metaheuristic optimization algorithm. Assuming that team  $i$  had played against team  $j$  at week  $t$  and the next opponent of the team  $i$  for the week  $t+1$  is team  $l$  who had competed with team  $k$  at week  $t$ . Therefore, four different cases are available based on the winner/loser conditions of four teams. The new formation of the teams considering the conditions in week  $t$  is determined through the following strategies:

- If both team  $i$  and team  $l$  were the winners of the week, strength/thread (S/T) strategy is applicable to create new formations with the given equation below:

$$x_{id}^{t+1} = b_{id}^t + y_{id}^t (\psi_1 r_{1id} (x_{id}^t - x_{kd}^t) + \psi_1 r_{2id} (x_{id}^t - x_{jd}^t)) \quad (6)$$

- If team  $i$  was the winner while team  $l$  was the loser, strength/opportunity (S/O) strategy is applied to the team  $i$  as expressed below:

$$x_{id}^{t+1} = b_{id}^t + y_{id}^t (\psi_2 r_{1id} (x_{kd}^t - x_{id}^t) + \psi_1 r_{2id} (x_{id}^t - x_{jd}^t)) \quad (7)$$

- If team  $i$  was the loser and team  $l$  was the winner of the week, weakness/tread (W/T) strategy, given in the below equation, is applied to the team  $i$ .

$$x_{id}^{t+1} = b_{id}^t + y_{id}^t (\psi_1 r_{1id} (x_{id}^t - x_{kd}^t) + \psi_2 r_{2id} (x_{jd}^t - x_{id}^t)) \quad (8)$$

- If both team  $i$  and team  $l$  were the losers of the week, the new team formations are adjusted according to weakness/opportunity (W/O) strategy as expressed below:

$$x_{id}^{t+1} = b_{id}^t + y_{id}^t (\psi_2 r_{1id} (x_{kd}^t - x_{id}^t) + \psi_2 r_{2id} (x_{jd}^t - x_{id}^t)) \quad (9)$$

Here,  $d$  refers to the dimension of the problem, while  $r_{1id}$  and  $r_{2id}$  are the uniform random numbers within the interval of  $[0,1]$ .  $\psi_1$  and  $\psi_2$  are the algorithm parameters which determine how much strength-weakness and opportunity-thread approaches make contributions.  $y_{id}^t$  is a parameter which decides whether the  $d$ th variable in the new formation will be changed or not. Therefore, if its value is 1, it means that variable  $d$  will be updated according to Equations 6 to 9; otherwise it will remain the same. The number of variables, which will be updated, is also designated by another LCA parameter,  $q_i^t$  and it is defined in Equation 10.



$$q_i^t = \left\lceil \frac{\ln(1 - (1 - (1 - p_c)^{n-q_0+1})r)}{\ln(1 - p_c)} \right\rceil + q_0 - 1 \quad (10)$$

In order to determine the number of changes dynamically, LCA utilizes the truncated geometric probability distribution (Kashan, 2014). In Equation 10,  $p_c$  corresponds to the probability of success which is less than one and not equal to zero,  $r$  is a random number between [0,1], and  $q_0$  is the least number of changes. Making use of the given equations above, the new team formations are generated, and the algorithm goes on its stages until reaching the termination criteria.

## 2.5. Backcalculation Algorithm: LCA-ANN

In the current study, the ANN forward response model is combined with the LCA search technique to form the LCA-ANN backcalculation algorithm. In this section, the working scheme of the LCA-ANN backcalculation algorithm is expressed with the steps given below:

1. Control parameters of the LCA;  $L$ ,  $S$ ,  $p_c$ ,  $q_0$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  are defined prior to the initialization of the algorithm.
2. Team formations (each team has  $n$  dimensions, which refers to the  $t_{AC}$ ,  $E_{AC}$ , and  $E_{Ri}$ ) are initialized randomly according to their lower and upper bounds given in Table 1. It should be noted that  $t_{AC}$  is known, and only layer moduli are being searched.
3. Team formations are transmitted to the ANN model, and each team produces a set of deflections  $D_0$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{24}$ , and  $D_{36}$ .
4. Playing strength of the teams is calculated through the fitness function given in Equation 11. In the equation,  $FWD_i$  and  $ANN_i$  are the measured and calculated deflections at the sensor number  $i$  of where 1 refers to  $D_0$  measurement, while 4 corresponds to the  $D_{36}$  measurement.

$$fitness = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^4 (FWD_i - ANN_i)^2} \quad (11)$$

5. According to Equation 5, winners and losers of the competitions are determined for the current week.
6. Using the winning and losing information, the new team formations are generated on the basis of Equations 6 to 10.
7. The new team formations are provided to the ANN model for the following week.

The processes continue from Step 2 to 7 until reaching the termination criteria.

## 3. Results

In order to evaluate the performance of the proposed LCA-ANN backcalculation algorithm, two different FWD dataset that the first one is synthetically generated with the FE model and the other one is the field data, which is extracted from the Long Term Pavement Performance (LTPP) Program database, are utilized. To assess the searching capability of LCA, the same ANN forward response model is combined with the well-known optimization algorithms; SGA and PSO (namely SGA-ANN and PSO-ANN), and their moduli estimation and convergence performances are investigated, respectively.

SGA is a population-based evolutionary optimization algorithm that searches the optimum solution of problems by mimicking the survival of the fittest approach in nature (Goldberg, 1989). The algorithm starts with the random generation of the population having individuals called phenotypes in natural selection, and as the result of fitness evaluation of phenotypes, a set of fittest individuals are selected to form the next generation of the population. To perform that, the simulation of crossover and mutation operations are utilized for the purpose of transferring the best individuals' information to the future generations and enabling the population diversity.

PSO, which is also a population-based search algorithm, simulates the social behavior of a bird flock or a fish school (Kennedy and Eberhart, 1995). The aim of the algorithm is to converge all the members of the population around the optimum points. In PSO, the population is randomly initialized and each individual's best location and the global best location of the population are stored to find the optimum solution. Each particle in the population is defined with its position and velocity. The velocity determines how much the individual moves by evaluating the local and global best positions of the population.

### 3.1. Parameter Settings

To ensure the consistency within the results of LCA-ANN, SGA-ANN and PSO-ANN algorithms, the population is considered to be composed of 50 teams/individuals/phenotypes. While the termination criterion is set as 100 maximum number of iterations for SGA-ANN and PSO-ANN, 5000 number of function evaluations (equal to the 100 iterations x 50 teams) are defined for the LCA-ANN. Each algorithm has its own control parameters that affect the accuracy of the solutions. The control parameters of LCA are determined through the performed parameter tuning studies, SGA and PSO parameters are decided in the light observed better performance and proposed values by the researchers as given in Table 2 (Shi and Eberhart, 1998; Reddy et al., 2004).

**Table 2.** Parameter Settings of LCA, PSO, and SGA

ALGORITHM	PARAMETERS		
LCA	$\psi_1$	$\psi_2$	$p_c$
	0.2	1	0.1
PSO	$w$	$c_1$	$c_2$
	0.9	0.5	2.2
SGA	$p_{cr}$	$p_m$	
	0.74	0.1	

where  $w$ ,  $c_1$ , and  $c_2$  are the inertia weight, cognitive and social scaling factors, and  $p_{cr}$  and  $p_m$  are the probability of crossover and mutation, respectively.

### 3.2. Analysis of Synthetic Data

Among the testing dataset, 20 different FDP sections given in Table 3 are randomly selected to evaluate the estimation performance of the backcalculation algorithms. Each pavement section in the dataset is analyzed 5 times, and the results are averaged. To calculate the error between actual and estimated  $E_{AC}$  and  $E_{Ri}$  data, the mean absolute percentage error (MAPE) function is utilized as given in Equation 12.

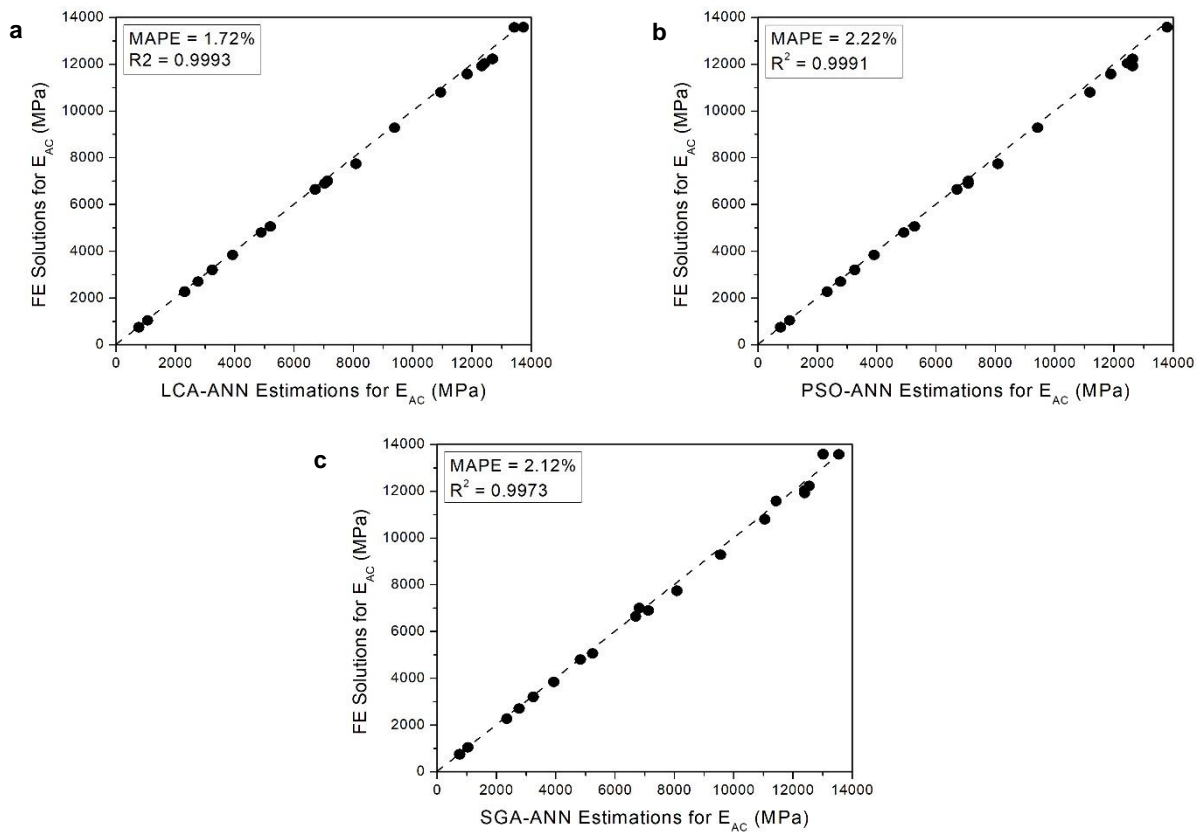
$$MAPE = \frac{100\%}{20} \sum_{i=1}^{20} \left| \frac{actual_i - estimated_i}{actual_i} \right| \quad (12)$$

where  $actual_i$  and  $estimated_i$  are the actual and backcalculated layer moduli values, respectively.

**Table 3.** Analyzed FDP Sections

SECTION NO	$t_{AC}$ (mm)	$E_{AC}$ (MPa)	$E_{Ri}$ (MPa)
1	457	10804	14
2	368	2709	24
3	264	5070	45
4	239	12041	30
5	185	6651	57
6	434	13576	67
7	290	3212	16
8	318	3851	73
9	198	756	47
10	422	11922	56
11	163	760	25
12	389	6908	28
13	180	13586	13
14	211	11584	51
15	226	9290	29
16	224	4806	76
17	269	1050	78
18	378	2282	73
19	378	12229	39
20	300	7003	62

Figure 2 shows the  $E_{AC}$  prediction capability of the algorithms against the ILLI-PAVE FE solutions. While LCA-ANN estimated the  $E_{AC}$  with 1.72% MAPE value, PSO-ANN and SGA-ANN obtained 2.22% and 2.12% error values, respectively. It can be seen that LCA-ANN presents better performance compared to PSO-ANN and SGA-ANN.



**Figure 2.**  $E_{AC}$  estimation performance of **a)** LCA-ANN, **b)** PSO-ANN, **c)** SGA-ANN

In Figure 3,  $E_{RI}$  estimation performance of the algorithms is presented. It is observed that LCA-ANN shows much better performance compared to the other algorithms. The promising results obtained with the LCA-ANN algorithm gave 1.93% MAPE value. The error values are 2.84% and 3.04% PSO-ANN and SGA-ANN, respectively. According to the results of synthetic data, it is concluded that LCA-ANN is a backcalculation tool capable of estimating layer moduli with smaller order of errors compared to other algorithms through synthetic FE solutions. On the other hand, it is seen that LCA shows better performance on the searching of the best set of layer properties giving the closest deflection basin to the field measurements against the well-known SGA and PSO algorithms.

### 3.3. Analysis of Field Data

The results obtained in the previous section have to be validated with the field FWD data since the synthetic sections are numerical models, and for this reason, these sections may not actually include all factors affecting the in-service pavement. Therefore, FWD tests data of an FDP section collected from the field throughout the years are extracted from the LTPP Program database, which can be accessed online (FHWA, n.d.).

The selected pavement section with the 18-A350 identification number is located in Indiana, USA. The section was constructed in 1975, and it has been monitored and different types of performance data had been collected between 1987 and 1995. The section is composed of about 390 mm of asphalt layer placed over the lean organic clay. In the study, FWD tests applied in the years of 1990, 1993, 1994, and 1995 are chosen to backcalculate the layer moduli. While selecting the data the same FWD loading conditions (equal to 552 kPa pressure) are taken into consideration and corresponding deflection data is extracted.

Extracted FWD deflection data and layer thickness are utilized by the backcalculation algorithms, and each year's data is run for five individual times, and results are averaged. Figure 5 presents the estimation performance of the algorithms and the readily available backcalculated layer moduli values in the LTPP database. LTPP Program uses Evercalc 5.0 commercial backcalculation software to analyze the collected FWD data. Evercalc 5.0 employs LET based analysis software WESLEA as the forward response engine and Augmented Gauss-Newton algorithm as the search approach (Washington State Department of Transportation, 2005).

As can be seen in Figure 4, each approach estimates  $E_{AC}$  close to each other and LTPP value as well. Since Evercalc also takes into account the asphalt layer as presenting linear elastic behavior, obtained results are interpreted as consistent. However, the average estimation of LCA-ANN seems closer to the LTPP calculations. On the other hand,

larger standard deviations are observed in SGA-ANN solutions comparing to other results. When the  $E_{Ri}$  is investigated, it is seen that significant differences between algorithms and LTPP solutions are observed. It is thought that the reason for these discrepancies is mainly caused by the considered nonlinear material behavior of subgrade. Therefore, it is concluded that our approaches produce more realistic layer moduli for fine-grained subgrade comparing to the LTPP solutions. Just like the  $E_{AC}$  estimations, SGA-ANN estimates the  $E_{Ri}$  with larger standard deviations.

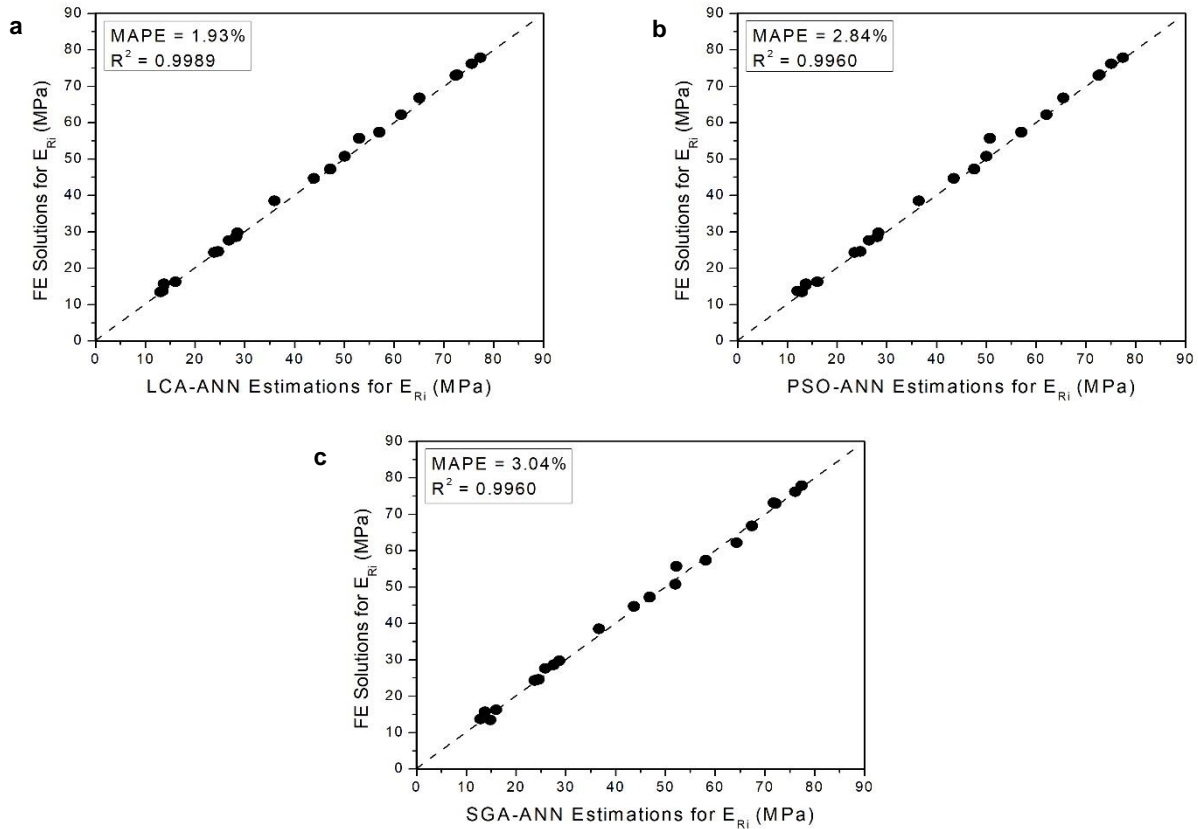


Figure 3.  $E_{Ri}$  estimation performance of a) LCA-ANN, b) PSO-ANN, c) SGA-ANN

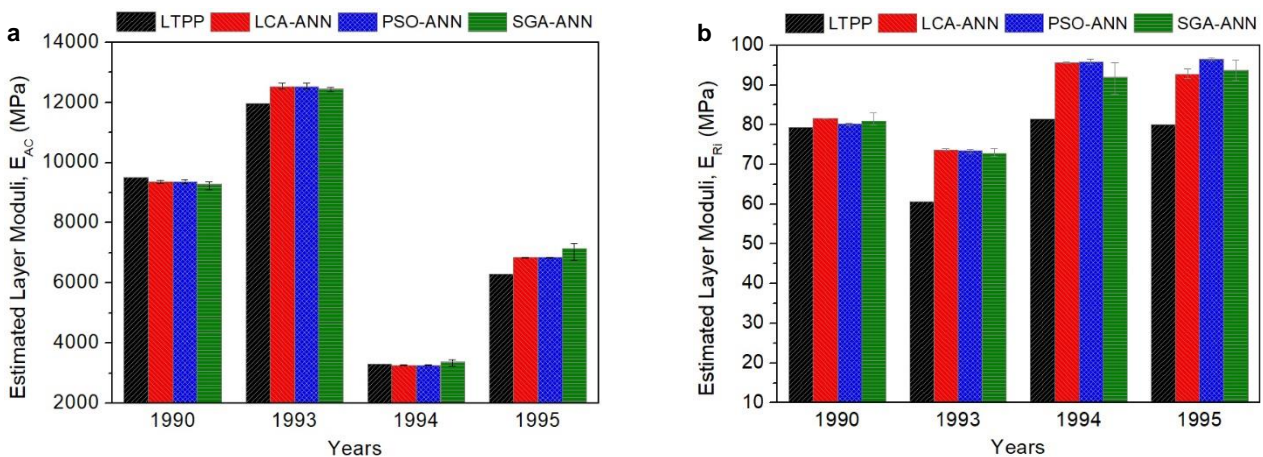
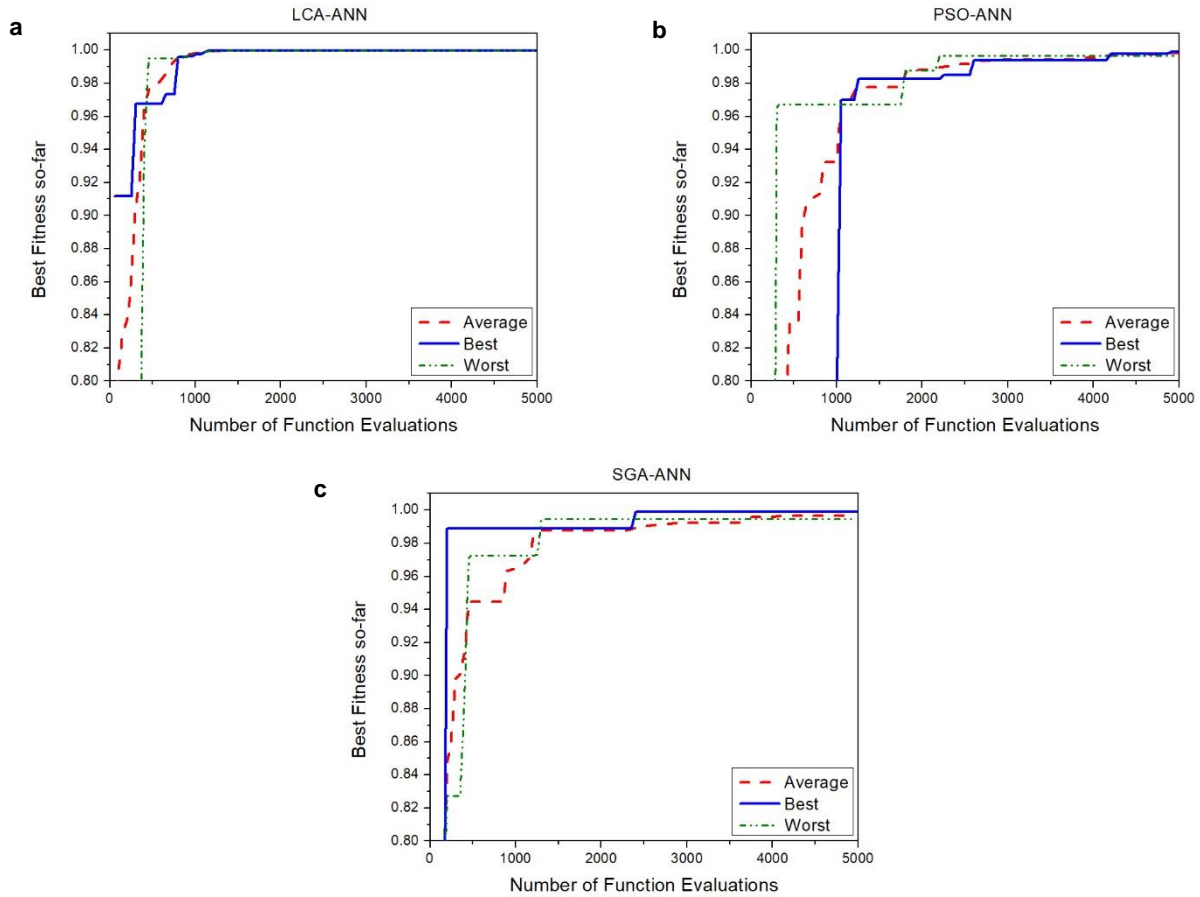


Figure 4. Field data prediction performance of a)  $E_{AC}$ , b)  $E_{Ri}$

### 3.4. Evaluation of Convergence Performance

In this section, the convergence performance of the metaheuristic search techniques is investigated through the analysis of a randomly selected synthetic test section. The section analyzed five times with each algorithm and obtained best, worst and average fitness curves are plotted as depicted in Figure 5. As can be seen that LCA obtains higher fitness values, which are closer to the maximum fitness, for each of the best, worst, and average curves. On the other hand, SGA and PSO algorithms converge their maximum values gradually after the 2500 function

evaluations while LCA gets closer to the maximum value around the 1000 function evaluations. It is evident that LCA can reach the optimum solution with less number of function evaluations than the other algorithms. Therefore, it is proved that LCA has the capability of handling the complex search space of pavement backcalculation problems without trapping the local optimum points with less efforts.



**Figure 5.** Convergence Performance of **a)** LCA-ANN, **b)** PSO-ANN, **c)** SGA-ANN

#### 4. Discussion and Conclusion

In this study, a backcalculation algorithm, namely LCA-ANN, is proposed to backcalculate the mechanical layer properties of the FDP sections. Since the pavement backcalculation problem has an ill-posed nature and the solution space of the problem is complex and nonlinear, it requires intelligent strategies to tackle these difficulties. Within this respect, ANN forward response model is trained with a large number of solutions of FE analysis where the nonlinear material behavior of fine-grained subgrade soil is considered in order to increase the accuracy of the calculated deflections. In this way, it is aimed to calculate the surface deflections accurately within a short span of time. The other component of the proposed tool is the LCA metaheuristic search approach, which is utilized to effectively search for the set of layer moduli values in the complicated search domain. LCA tries to find the best pair of  $E_{AC}$  and  $E_{Ri}$  that produces the closest deflection basin to that of measured by FWD. The performance of the proposed LCA-ANN algorithm is investigated with both synthetically generated deflection basins by an FE software and field deflections gathered from the LTPP database. Moreover, to evaluate the search capability of LCA, well-accepted metaheuristic search algorithms SGA and PSO are also combined with the ANN forward model, and the same analyses are performed as well. Obtained results show that the LCA-ANN algorithm provides reasonable solutions with a low order of error values for both  $E_{AC}$  and  $E_{Ri}$  estimations comparing to the SGA-ANN and PSO-ANN predictions. Also, the results indicated that LCA-ANN gives consistent result to the FE solutions and show fewer variations. When the analysis of field data is examined, it is seen that the solutions of each approach are in agreement with the solutions of commercial backcalculation software Evercalc in the  $E_{AC}$  prediction part. Since each approach takes into accounts the same material nature for the asphalt layer, the success of the proposed method can be presented. However, there is a slight variation between  $E_{Ri}$  estimations of proposed methods and the Evercalc solutions, due to the considered nonlinear stress softening nature of the subgrade by our forward model. Therefore, the solutions of our approach can be considered more realistic. In the convergence performance comparison of the algorithms, it is seen that LCA performs excellent convergence performance by reaching the best fitness value at earlier stages of the iterations. These results indicate the success of LCA in the exploration and

exploitation of the search space. Since the forward response model is developed with the synthetic data considering linear and nonlinear material models, some conditions encountered in the real conditions may not be taken into account. Therefore, to improve the overall performance of the response model, field data can also be utilized to consider the actual cases over the pavements in future studies. On the other hand, taking into account the viscoelastic material properties of the asphalt layer may also contribute to the accuracy of the forward response calculations by considering the temperature and dynamic FWD loading effects. However, employing real data and viscoelastic material nature can increase the complexity of the problem, and therefore, it is necessary to obtain much data to develop efficient and robust response calculations. Here, it is also proposed to utilize other machine learning approaches to handle the difficulties in the backcalculation problem. Overall, LCA-ANN, which is an efficient and powerful tool that estimates the layer moduli values with high accuracy, is developed in the present study, and it has the potential to be employed in real-time pavement performance investigation applications.

### Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

### References

- Baltacıoğlu, A.K., Civalek, Ö., Akgöz, B., Korkmaz, A., 2010. Deprem Hasarlarının Hızlı Tespitinde Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı Artificial Neural Networks Approach for Fast Earthquake Damage Determination. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 1 (1), 22–27.
- Ceylan, H., Guclu, A., Tutumluer, E., Thompson, M.R., 2005. Backcalculation of full-depth asphalt pavement layer moduli considering nonlinear stress-dependent subgrade behavior. *International Journal of Pavement Engineering*. 6 (3), 171–182.
- FHWA, n.d. LTPP InfoPave [Web Document]. URL <https://infopave.fhwa.dot.gov/> (accessed 2.18.20).
- Fileccia Scimemi, G., Turetta, T., Celauro, C., 2016. Backcalculation of airport pavement moduli and thickness using the Levy Ant Colony Optimization Algorithm. *Construction and Building Materials*. 119 (2016), 288–295.
- Goktepe, A.B., Agar, E., Lav, A.H., 2006. Advances in backcalculating the mechanical properties of flexible pavements. *Advances in Engineering Software*. 37 (7), 421–431.
- Goldberg, D.E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Gopalakrishnan, K., 2009. Backcalculation of Pavement Moduli Using Bio-Inspired Hybrid Metaheuristics and Cooperative Strategies. *Proceedings of the 2009 Mid-Continent Transportation Research Symposium*. Ames, IA.
- Gopalakrishnan, K., Khaitan, S.K., 2010. Development of an intelligent pavement analysis toolbox. *Proceedings of the ICE - Transport*. 163 (4), 211–221.
- Gurney, K., 2005. *An introduction to neural networks*. Taylor & Francis.
- Hu, K.-F., Jiang, K.-P., Chang, D.-W., 2007. Study of Dynamic Backcalculation Program with Genetic Algorithms for FWD on Pavements. *Tamkang Journal of Science and Engineering*. 10 (4), 297–305.
- Huang, Y., 2003. *Pavement Analysis and Design*, 2nd ed. New Jersey (NJ): Pearson Prentice Hall.
- Kashan, A.H., 2009. League Championship Algorithm: A New Algorithm for Numerical Function Optimization. 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition. IEEE, pp. 43–48.
- Kashan, A.H., 2014. League Championship Algorithm (LCA): An algorithm for global optimization inspired by sport championships. *Applied Soft Computing*. 16, 171–200.
- Katanalp, B.Y., Yıldırım, Z.B., Karacasu, M., İbrikçi, T., 2019. Betonun Performans Karakteristiklerinin Yapay Sinir Ağları ve Merkezi Kompozit Tasarım Yöntemleri Kullanılarak Karşılaştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 7 (3), 680–688.
- Kennedy, J., Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. pp. 1942–1948.
- Keskin, M.E., Taylan, E.D., 2010. Artificial Intelligent Models For Flow Prediction : A Case Study On Alara Stream. *Journal of Engineering Science and Design*. 1 (1), 8–13.
- Kim, N., Im, S.-B., 2005. A comparative study on measured vs. Predicted pavement responses from falling weight deflectometer (FWD) measurements. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 9 (2), 91–96.
- Li, M., Wang, H., 2019. Development of ANN-GA program for backcalculation of pavement moduli under FWD testing with viscoelastic and nonlinear parameters. *International Journal of Pavement Engineering*. 20 (4), 490–498.
- Meier, R., Rix, G., 1994. Backcalculation of flexible pavement moduli using artificial neural networks. *Transportation Research Record*. 1448, 75–82.
- Meier, R.W., 1995. Backcalculation of Flexible Pavement Moduli from Falling Weight Deflectometer Data Using Artificial Neural Networks. U.S. Army Engineer Waterways Experimental Station.
- Öcal, A., 2014. Backcalculation of Pavement Layer Properties Using Artificial Neural Network Based Gravitational Search Algorithm. M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Rakesh, N., Jain, A., Reddy, M.A., Reddy, K.S., 2006. Artificial neural networks—genetic algorithm based model for backcalculation of pavement layer moduli. *International Journal of Pavement Engineering*. 7 (3), 221–230.
- Reddy, M.A., Reddy, K.S., Pandey, B.B., 2004. Selection of Genetic Algorithm Parameters for Backcalculation of Pavement Moduli. *International Journal of Pavement Engineering*. 5 (2), 81–90.
- Saltan, M., Tigdeir, M., Karasahin, M., 2002. Artificial neural network application for flexible pavement thickness modeling.

- Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. 26, 243–248.
- Saltan, M., Uz, V.E., Aktas, B., 2013. Artificial neural networks–based backcalculation of the structural properties of a typical flexible pavement. *Neural Computing and Applications*. 23 (6), 1703–1710.
- Sangghaleh, A., Pan, E., Green, R., Wang, R., Liu, X., Cai, Y., 2014. Backcalculation of pavement layer elastic modulus and thickness with measurement errors. *International Journal of Pavement Engineering*. 15 (6), 521–531.
- Scullion, T., Uzan, J., Paredes, M., 1990. Modulus: A Microcomputer-Based Backcalculation System. *Transportation Research Record*. (1260), 180–191.
- Sharma, S., Das, A., 2008. Backcalculation of pavement layer moduli from falling weight deflectometer data using an artificial neural network. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 35 (1), 57–66.
- Shi, Y., Eberhart, R., 1998. A modified particle swarm optimizer. *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. pp. 69–73.
- Sivaneswaran, N., Kramer, S.L., Mahoney, J.P., 1991. Advanced Backcalculation Using a Nonlinear Least Squares Optimization Technique. *Transportation Research Record*. (1293), 93–102.
- Thompson, M.R., Robnett, Q.L., 1979. Resilient Properties of Subgrade Soils. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*. 105 (1), 71–89.
- Uzan, J., Scullion, R., Michalek, C., Parades, M., Lytton, R., 1988. A microcomputer based procedure for backcalculating layer moduli from FWD data, Research Report 1123 -1.
- Washington State Department of Transportation, 2005. EVERSERIES USER'S GUIDE Pavement Analysis Computer Software and Case Studies.
- Zhou, H., Hicks, R.G., Bell, C.A., 1990. Bousdef: A Backcalculation Program for Determining Moduli of a Pavement Structure. *Transportation Research Record*. 1260 , 166–179.





## NESNELERİN İNTERNETİ İÇİN HİBRİT UYGULAMA KATMANI PROTOKOL TASARIMI

Erdal ÖZDOĞAN<sup>1\*</sup>, O. Ayhan ERDEM<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Bilişim Sistemleri Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Nesnelerin İnterneti,  
IoT Protokolleri,  
Hibrit IoT Protokolü,  
IoT Uygulama Protokolü,  
IoT Protokol Tasarım.*

### Öz

Nesnelerin İnternetinde, iletişim başarımını etkileyen önemli faktörlerden biri kullanılacak olan mesajlaşma protokolüdür. MQTT, XMPP ve AMQP merkezi yapıda ve sunucu aracılığıyla haberleşen uygulama protokolleridir. DDS ve CoAP ise özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda doğrudan iletişim için kullanılan uygulama protokolleridir. Nesnelerin İnternetinin giderek yaygınlaşması ve kullanım senaryolarının farklı gereksinimlere sahip olması, veri iletişimde yeni yaklaşımların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada hem merkezi sunucu aracılığıyla hem de doğrudan iletişim sağlayabilen UDP tabanlı hibrit bir protokol tasarlanmıştır. Geliştirilen protokolün çalışma mantığı, paket yapısı ele alınmış ve işlevsellik yönünden MQTT protokolü ile karşılaştırılmıştır.

## HYBRID APPLICATION LAYER PROTOCOL DESIGN FOR INTERNET OF THINGS

### Keywords

*Internet of Things,  
IoT Protocols,  
Hybrid IoT Protocol,  
IoT Application Protocol,  
IoT Protocol Design.*

### Abstract

One of the important factors affecting communication performance in the Internet of Things is the messaging protocol. MQTT, XMPP and AMQP are centralized application protocols that communicate through the server. DDS and CoAP are application protocols that can communicate directly, especially in real-time applications. As the Internet of Things is becoming more widespread and usage scenarios have different requirements, new approaches to data communication are required. In this study a UDP based hybrid protocol is designed which can communicate both directly and through central server. Operating logic and packet structure of the developed protocol is examined and compared with MQTT protocol with respect to their functionality.

### Alıntı / Cite

Özdoğan, E., Erdem, O.A., (2020). Nesnelerin İnterneti İçin Hibrit Uygulama Katmanı Protokol Tasarımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 285-304.

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

E. Özdoğan, 0000-0002-3339-0493  
O. A. Erdem, 0000-0001-7761-1078

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	21.02.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	09.09.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	27.11.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Başlangıcından günümüze kadar İnternetin geçirdiği büyük ve öngörülemez gelişimi, önümüzdeki yıllarda İnternet teknolojisindeki gelişmelerin ve yeniliklerin dünya çapında büyük yankılar uyandıracak olduğunu göstermektedir. 2012 yılında, internete bağlı cihazların sayısı, yeryüzünde yaşayan insanların sayısını aşmış ve 2020 yılında 26 ile 50 milyar arasında nesnenin internete bağlı olması beklenmekte ve bu cihazlardan milyonlarca gigabyte veri üreteceği tahmin edilmektedir (Anjum vd, 2014). Heterojen yapıda üretilen bu devasa ölçüdeki veri yığınının organize edilmesi, anlamlandırılması ve enformasyona dönüştürülmesi Nesnelerin İnternetinin (Internet of Things- IoT) karşı karşıya kaldığı önemli problemlerden biri olarak görülmektedir (Atzori, vd., 2010). Yakın gelecekte her cihazın veya nesnenin doğrudan ya da dolaylı olarak bir IP adresine sahip

\* İlgili yazar / Corresponding author: erdalozdogan@hotmail.com, +90-312-296-9566

olacağı öngörüsü, IP desteği olan protokollerin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır (Höller vd., 2014). Mevcut İnternet protokollerinin bu amacı karşılamadaki yetersizlikleri yeni protokollerin geliştirilmesine neden olmaktadır. Bu amaçla, nesnelerin internetinde veri transferi sağlamak amacıyla Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), Constrained Application Protocol (CoAP), Advanced Message Queuing Protocol (AMQP), Data Distribution Service (DDS) ve Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP) protokolleri geliştirilmekte ya da IoT gereksinimlerine göre uyarlanmaktadır (Gubbi vd., 2013). Diğer taraftan ITU-T'nin 2014 yılında yayınladığı "M2M service layer: APIs and protocols overview" isimli raporda, gelişen teknolojileri ve kullanım senaryolarını karşılamak amacıyla yeni protokollerin geliştirilmesi gerekliliği belirtilmektedir (ITU-T, 2014).

MQTT, AMQP ve XMPP protokolleri veri transferinde sunucu kullanan, merkezi protokollerdir (Talaminos-Barroso vd., 2016) . Bu yaklaşımda veriye erişmek isteyen istemci ile veri kaynağı arasında doğrudan bir iletişim bulunmamaktadır. CoAP ve DDS gibi protokoller ise, merkezi olmayan yaklaşım ile çalışan, doğrudan iletişim sunan protokollerdir (Bellavista & Zanni, 2016; Dizdarevic vd., 2018). Aracı sunucu kullanan merkezi yaklaşım ile merkezi olmayan yaklaşımın her ikisinin de çeşitli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Merkezi olmayan yaklaşımın en önemli avantajlarından biri doğrudan iletişim kurabilmesidir (Collina vd., 2014). Ancak yönetimsel güçlükler bu mimarinin başta gelen dezavantajıdır (Fortino vd., 2014). Merkezi iletişimin en önemli avantajlarından biri ise, iletişimin sunucu tarafından kontrol edilebilir olmasıdır. Ancak sunucunun kullanılması, tek bir hata noktasının oluşmasına neden olmaktadır (Bellavista & Zanni, 2016; H. Kim, 2017; Su vd., 2014; Thota & Kim, 2016; Pathania, 2017). Sunucu devre dışı kaldığında veri iletişimi kesilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, veri iletişimde hem sunucu tabanlı çalışan hem de doğrudan iletişim yeteneğine sahip, hibrit bir uygulama katmanı protokolü (hIoT) tasarlanmıştır. Tasarlanan protokol kısıtlı kaynaklara sahip cihazlarda, düşük bant genişliğine sahip ortamlarda, sensörlerden üretilen düşük boyutlu verilerin transferini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Geliştirilen protokolda sensörler tarafından sunulan hizmetlerin, doğrudan ya da sunucu tabanlı iletişim seçimi yapılabilmektedir. Bu sayede farklı amaçlar ve ihtiyaçlar doğrultusunda her iki iletişim yöntemi kullanılabilir ve bu iki yöntem arasında dinamik geçiş yapılabilir.

Makalenin ikinci bölümünde, IoT protokollerine yönelik yapılan akademik çalışmalar ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, yaygın olarak kullanılan CoAP ve MQTT protokolleri incelenmiştir. Makalenin dördüncü bölümünde, tasarlanan uygulama protokolünün genel çalışma prensibi, paket yapıları ve protokol bileşenleri incelenmiştir. Beşinci bölümde, geliştirilen protokolün deneysel başarımlar değerlendirilmeleri ele alınmış ve yaygın olarak kullanılan MQTT protokolü ile karşılaştırılmıştır. Makalenin son bölümünde, çalışmanın özetine ve önerilen protokolün avantajlarına yer verilmiş, gelecekteki çalışmalara ışık tutmak amacıyla önerilerde bulunulmuştur.

## 2. İlgili Çalışmalar (Related Work)

IoT'nin eksiksiz olarak hayata geçirilmesinde protokoller önemli bir rol oynamaktadır. IoT protokolleri ile ilgili son yıllarda birçok akademik çalışma yapılmaktadır. Mevcut IoT protokolleri üzerine yapılan çalışmalarda, bu protokollerin birbirlerine göre farklı alanlarda üstünlükler sağlayabildiği görülmektedir. Bu bölümde, IoT uygulama protokollerinin bant genişliği, gecikme yönünden başarımlar karşılaştırmalarına yönelik çalışmalar ve ortak çalışabilirlik yönünden yapılan araştırmalar ele alınmıştır.

MQTT ve CoAP protokollerinin birlikte çalışabilmesini sağlamak amacıyla ara katmanın geliştirildiği Thangavel ve arkadaşlarının çalışmasında (Thangavel vd., 2014) MQTT ve CoAP protokolleri uçtan uca gecikme ve bant genişliği tüketimi yönünden ele alınmıştır. Bu çalışmaya göre, %20'den daha düşük paket kayıplarının yaşandığı ortamlarda MQTT'nin; yüksek paket kayıplarında ise CoAP'ın daha yüksek başarımlar gösterdiği ifade edilmektedir. Paket kayıplarının olmadığı varsayımının yapıldığı ideal bir hücresel ağ ortamında başarımlar değerlendirilmesinin yapıldığı çalışmada (Lars, 2015) ise protokollerin ek yüklerine göre karşılaştırmaları yapılmakta ve 1024 byte'dan büyük ek yük durumlarında CoAP protokolünün performans kayıpları yaşadığı ortaya konmaktadır. Mobil ve stabil olmayan ağlarda yapılan çalışmada (Luzuriaga vd., 2015) MQTT ile AMQP protokolleri bant genişliği kullanımı, gecikme ve jitter etkisi yönlerinden karşılaştırılmakta, her iki protokolda de bu açılardan anlamlı bir farklılığın olmadığı ancak güvenlik açısından bakıldığında AMQP'nin; enerji verimliliği açısından ise MQTT'nin daha başarılı olduğu belirtilmektedir. Aynı verinin taşınmasında CoAP ile MQTT protokolünün karşılaştırıldığı diğer bir çalışmada (Shin vd., 2017) CoAP protokolünün daha verimli olduğu ifade edilmektedir. Yüksek ağ trafiğinin bulunduğu bir ortamda gerçekleştirilen çalışmada, MQTT protokolünün CoAP'a göre daha başarılı olduğu, daha yüksek net genişlik değerine ve daha düşük gecikmeye sahip olduğu belirtilmektedir (Collina vd., 2014).

Nesnelerin İnternetinde servis keşif problemini ele alan bir çalışmada, M.Kirsche ve arkadaşları, MQTT ve CoAP protokollerinin uçtan-uca iletişim sağlayamadığı, mesajların dönüştürülmesinden kaynaklanan gecikmelerin

yaşandığı ve keşif sürecinin karmaşık yapıda olduğu belirtmektedirler. Bu nedenle mDNS ve DNS-SD kombinasyonunu kullanan, sadeleştirilmiş bir yapı geliştirmişlerdir (Klauck & Kirsche, 2012) (Jara vd., 2012).

IoT Protokollerinin geliştirilmesi başlığı altında incelenebilecek (Choi vd., 2017) bir çalışmada MQTT ve CoAP protokollerinin nesnelerin interneti uygulamalarında yaygın kullanıldığına değinilmekte, ancak her iki protokolün de çok sayıda sensörün bulunduğu büyük ağlarda ölçeklenebilirlik problemleri ile karşı karşıya olduğu belirtilmektedir. İlgili çalışmada ölçeklenebilirliği sağlamak ve bant genişliğini verimli kullanmak amacıyla CoAP protokolünde iyileştirmeye gidilmiştir. Buna göre, sensörlerin bir küme oluşturacak şekilde gruplandırılması ve kümenin bir temsilci ile veri gönderilmesi sağlanmakta, sonuç olarak %18 daha az bant genişliği tüketimine ulaşıldığı ifade edilmektedir.

IoT sisteminin karmaşıklaşmaya başlaması, ağa bağlanan cihazların sayı ve türlerindeki artış, çözüm olarak hibrit yöntemlerin ele alınmasına neden olmaktadır. Protokollerin birlikte kullanımına yönelik olarak Bellavista ve arkadaşlarının çalışmasında (Bellavista & Zanni, 2016) CoAP ve MQTT'nin birlikte kullanımını hedefleyen bir mimari tasarlanmıştır. Çalışma, yüksek yoğunluklu ağlarda geliştirilen bu mimarinin ölçeklenebilirliği sağladığını ifade etmektedir.

Merkezi bir ara katman kullanılarak birden çok protokolün birlikte çalışmasını sağlamak amacıyla yapılan çalışma önemli boyutta performans kayıpları olmadan protokollerin birlikte çalışabilirliğini ortaya koymaktadır (Huo, 2014). "Custom UDP" olarak adlandırılan bir uygulama protokolü tasarımında ise önerilen protokol çeşitli IoT protokolleri ile karşılaştırılmış ve deneysel sonuçlara göre, tahmin edilemeyen paket kayıplarının bulunduğu ortamlarda görece düşük enerji ve bant genişliği tüketimi sunduğu ifade edilmektedir (Chen & Kunz, 2016).

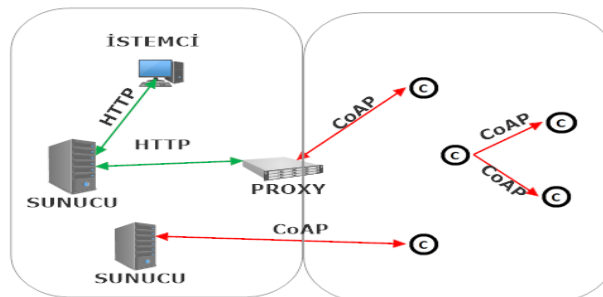
Görüldüğü üzere Nesnelerin İnternetinde belirli bir protokolün diğerine göre her alanda bir üstünlüğü olduğunu ifade etmek çok güçtür. Kullanılan ağ topolojisi, güvenlik ihtiyacı, ölçeklenebilirlik, bant genişliği kullanımına göre farklı protokoller kullanılabilir. Ayrıca ara katman yazılımlarının çeşitliliği, IoT cihazlarına bağlantı kurulmasını ve toplanan verilerin yorumlanmasını güçleştirmektedir (Ngu, Gutierrez, Metsis, & Sheng, 2017). IoT ekosisteminin heterojen yapısı, giderek artan oranda bir büyüme eğilimi farklı protokol ihtiyacını da beraberinde getirmektedir.

### 3. IoT Uygulama Katmanı Protokolleri (IoT Application Layer Protocols)

IoT iletişimin başarımını belirleyen en önemli faktörlerden biri kullanılacak olan mesajlaşma protokolünün belirlenmesidir. Organizasyonlar için en uygun protokolün belirlenebilmesi, bu protokollerin özelliklerinin ve gereksinimlerinin anlaşılmasına bağlıdır (Naik, 2017). IoT protokolleri ile ilgili akademik çalışmalara konu olan ve yaygın olarak kullanılan protokoller özellikleri açısından incelendiğinde uygulama katmanı protokolleri, servis keşif protokolleri ve altyapı protokolleri olmak üzere üç kategori altında toplandığı görülmektedir (Florea vd., 2017). Bu bölümde uygulama katmanı protokollerinden yaygın olarak kullanılan MQTT ve CoAP ele alınmıştır.

#### 3.1. Constrained Application Protocol (CoAP)

İnternet Mühendisliği Görev Gücü (IETF) tarafından tasarlanan Kullanıcı Datagram Protokolü (User Datagram Protokolü-UDP) tabanlı bu protokol (Lars, 2015), nesnelerin internetinin bir türü olan Nesnelerin Web'inde makineler arası iletişimde (M2M) kullanılmak üzere tasarlanmıştır (Florea vd., 2017; Naik, 2017; Shin vd., 2017). CoAP yapısında her bir nesne, basit bir sunucu görevi görmektedir. Kısıtlı düğümler arasında ve kısıtlı ağlarda iletişim kurmak için sunucu - istemci mimarisinde, istek / cevap mesajları ile haberleşen bir yapıda geliştirilmiştir. CoAP protokolünde cihazlar ve bu cihazların rolleri Şekil 1'de gösterilmiştir.

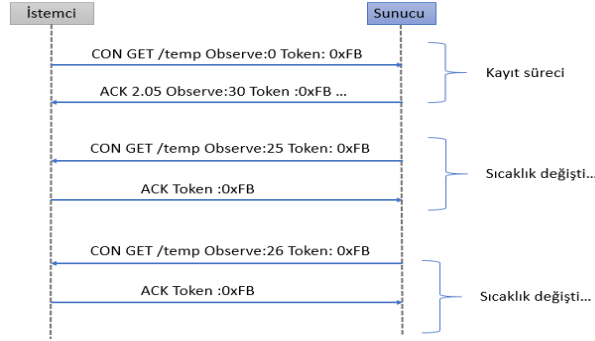


Şekil 1. CoAP protokolünde cihazlar ve roller (Devices and their roles in CoAP)

İstemciler sunucuda verilen hizmetlere GET, PUT, POST ve DELETE yöntemleri ile erişebilmektedir (Gündoğan vd., 2018). Uç noktalar arasındaki iletişimde kullanılan CoAP iletilerinde, aşağıdaki gibi kaynak cihaz erişim bilgilerini içeren URI yapısı kullanılmaktadır (Shelby vd., 2014; Ishaq vd., 2013):

GET coap :// [<IoT cihaz IP adresi>]:[<port numarası>]/[kaynak URI adresi]

CoAP protokolün en önemli avantajlarından biri, http protokolüne kolay entegre olabilmeye yeteneğidir (Naik, 2017). İnternet ortamında çoğu uygulama http protokolünü kullandığından, CoAP mesajlarını http mesajlarına dönüştüren bir vekil sunucu kullanılabilir (M. Koster & Keranen, 2015).



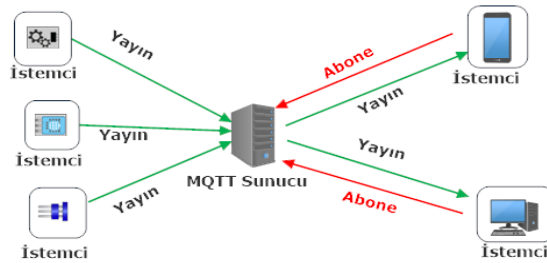
Şekil 2. CoAP iletişiminin adımları (Communication steps of CoAP)

CoAP protokolünde veri kaynağında her değişiklik olduğunda istemciye bilgi gönderilir. Böylece ortam değişikliği durumunun istemciye bildirilmesi sağlanır. CoAP protokolünün bu işlem adımları örnek olarak Şekil 2’de gösterilmiştir. CoAP protokolünde, onay gerektiren, onay gerektirmeyen, onay ve sıfırlama olmak üzere dört tür paket bulunmaktadır (Thangavel vd., 2014). UDP protokolü kullanıldığından, mesajların hedefe ulaşım ulaşımadığının doğruluğu, onay gerektiren paketler ile sağlanmaktadır.

### 3.2. Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

M2M iletişimi için tasarlanan, sunucu istemci mimarisi ile çalışan IBM kökenli bir protokol olup abonelik ve yayın mesajları yapısında kullanılmaktadır (Chen & Kunz, 2016). Kısıtlı bant genişliği sunan konular arasında veri transferi sağlamak amacıyla geliştirilmiş İletim Denetim Protokolü (Transmission Control Protocol – TCP) tabanlı bir protokoldür (Anjum vd., 2014). Ağda bulunan birçok cihazdan veri toplamak ve verileri ihtiyaç duyan cihazlara ya da yazılımlara sunmak üzere tasarlanmıştır.

Bu uygulama katmanı protokolünde abone, yayıncı ve sunucu olmak üzere üç rol bulunmaktadır (Schmitt, Carlier, & Renault, 2018). İstemci rolünde bulunan abone ile yayıncı arasındaki tüm iletişimin koordinesi sunucunun sorumluluğundadır (Pathania, 2017). Yayıncı bir “konu” (topic) ile ilişkilendirilmiş bir mesaj gönderdiğinde, sunucusu mesajı alır, mesajın konusuna abone olan kullanıcıyı sorgular ve mesajı iletir (Tantitharanukul vd., 2016). MQTT protokolünün çalışma sistemi Şekil 3’te gösterilmiştir.



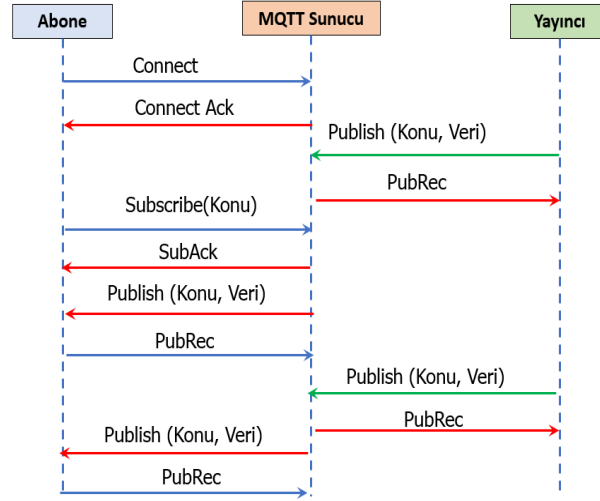
Şekil 3. MQTT protokolünde cihazlar ve cihazların görevleri (Devices and their roles in MQTT protocol)

Abonelik sisteminde kullanılan “konu” kavramı (Sasaki vd., 2018), hiyerarşik bir yapıda konum ve hizmet bilgisini içeren aşağıdaki gibi bir diziden oluşmaktadır (Menyah, 2017).

*BinaA/Kat3/DerslikB/SICAKLIK*

Bu örnekte A binası 3.katındaki, B dersliğinin sıcaklık bilgisi “konu” olarak ifade edilmiştir.

MQTT iletişimde kullanılan mesajların paket başlığı küçük boyutlu olup 14 farklı paket türü kullanılmaktadır (Kimsey vd., 2015). İstemci ile sunucu arasındaki paketlerin akışı Şekil 4'te gösterilmiştir.



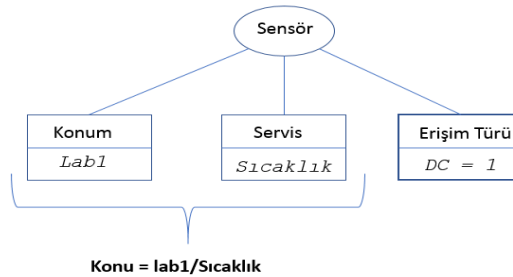
Şekil 4. MQTT paketlerinin akışları (Packet flows of MQTT)

MQTT yapısında mesajın ulaşip ulaşmadığının garantisinin düzeyini tanımlamak üzere üç düzey hizmet kalitesi (QoS) bulunmaktadır (Sch vd., 2017). QoS0 yapısında ileti sadece gönderilir, mesajın alındığına ilişkin geri bildirim bulunmamaktadır. QoS1 düzeyinde ise mesajın alındığına dair abone cihazdan yayıncıya PUBACK geri bildirim mesajı gönderilir. MQTT'nin en güvenli iletim şekli QoS2 düzeyindedir. Buna göre yayıncı, QoS2 düzeyinde mesajına sahip olduğunu bildiren bir ileti (PUBLISH) gönderir. Abone alıcı, iletiyi almaya hazır olduğunu gösteren PUBREC mesajı göndermektedir. Yayıncı PUBREL mesajını, aboneye iletir. Alıcı bu mesajı aldığı anda, işlemi PUBCOMP mesajı ile onaylamaktadır (Gündoğan vd., 2018).

IoT ekosisteminde ağa bağlı cihazların çeşitli ve farklı gereksinimleri olduğundan, tek bir protokolün baskın bir şekilde kullanılması olası değildir. Hangi protokolün daha uygun olacağı, sistemde kullanılan uygulamalara ve kullanıcı gereksinimlerine bağlıdır.

#### 4. Geliştirilen Uygulama Katmanı Protokolü (Developed Application Layer Protocol)

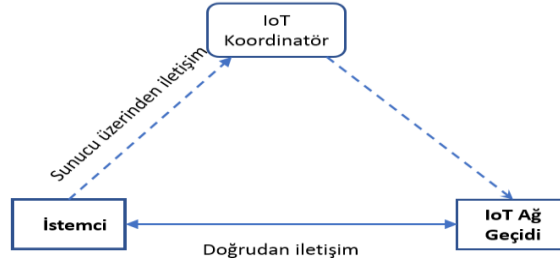
Nesnelerin İnterneti kapsamında son yıllarda güvenlik, kaynak keşfi, ortak çalışabilirlik, uyumluluk ve performans geliştirmeleri gibi problem durumlarına yönelik çeşitli araştırmalar ve akademik çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında bu problem durumlarının tümüne odaklanılmamış ve bazı varsayımlar dikkate alınmıştır. Buna göre, her ne kadar güvenlik kavramı IoT için kritik bir öneme sahip olsa da bu çalışmada ortamın güvenli olduğu varsayılmış ve veri güvenliği kapsamı dışında tutulmuştur. Sensörlerin kayıt ettirilmesi ve kaynak keşfi sürecinde, MQTT ve CoAP protokollerine uyum sağlamak amacıyla sensöre ait konum ve hizmet bilgisi dikkate alınmış, sensör üreticisi, sensör tipi gibi parametreler dikkate alınmamıştır. Sensörden sunulan hizmetin belirlenmesinde konum ve servis bilgisi, MQTT yapısında kullanılan "konu" ile uyumluluk sağlamak amacıyla Şekil 5'de gösterildiği gibi tasarlanmıştır.



Şekil 5. Geliştirilen protokolda kullanılan sensör özellikleri (Sensor features used in the developed protocol)

Bu çalışmada sensörlerden elde edilen verilerin tek bir veri paketi içinde taşınabildiği, IP paketlerinin parçalara ayrılmadığı varsayılmıştır.

IoT sisteminde kullanılan cihazlar kısıtlı kaynaklara sahip olduklarından, yüksek işlem gücü, bellek ve bant genişliği tüketimi gerektiren uygulamalar, ihtiyacı karşılamada yetersiz ve verimsiz olmaktadır. Bu nedenle geliştirilen protokol, düşük kaynaklarda çalışabilecek esneklikte ve basit yapıda olacak şekilde tasarlanmıştır.

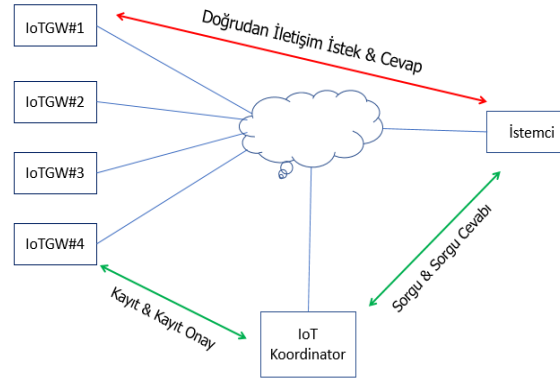


**Şekil 6.** Hibrit Uygulama Protokolü doğrudan iletişim ve sunucu tabanlı iletişimi destekler (Hybrid Application Protocol supports both direct and server based communication)

Çalışma kapsamında hem merkezi sunucu ile çalışan hem de doğrudan erişim destekleyen, Şekil 6'da gösterildiği gibi hibrit bir uygulama katmanı protokolü (hIoT) geliştirilmiştir. Sensör türüne göre, doğrudan erişim ya da sunucu aracılığı ile erişim yöntemlerinden biri seçilebilir. Sunucu devre dışı kaldığında ise, doğrudan erişim yöntemine geçilebilen dinamik bir yapı tasarlanmıştır. Böylece sunucu tabanlı çalışan protokollerde yaşanan tek bir hata noktasının önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

#### 4.1. Genel Çalışma Prensibi (General Working Principle)

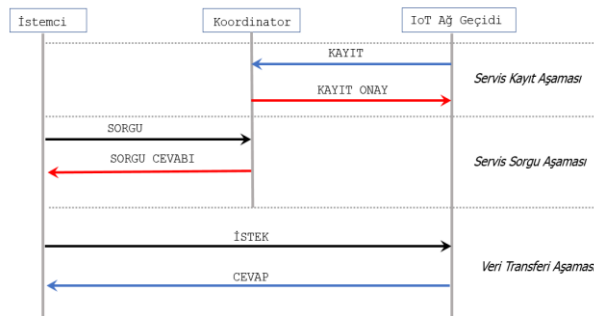
Tasarlanan sistemin doğru bir şekilde çalışabilmesi için, Nesnelerin İnterneti ekosisteminde cihazların rollerinin kesin bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Belirlenen roller sayesinde ağ iletişiminin modeli tanımlanabilmektedir.



**Şekil 7.** Geliştirilen protokolde cihazlar ve iletişim paketleri (Devices and communication packets in developed protocol)

Geliştirilen protokolde Şekil 7'de gösterildiği gibi, IoT Koordinatör, IoT Ağ Geçidi (IoTGW) ve İstemci olmak üzere üç farklı bileşen tanımlanmıştır. Bu bileşenlerin görevleri 4.6 başlığında ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Protokolün çalışması Şekil 8'de gösterildiği gibi, Servis Kayıt Aşaması, Servis Keşif Aşaması ve Veri Transfer Aşaması olmak üzere üç aşamada incelenmektedir.



**Şekil 8.** Geliştirilen protokolün temel aşamaları (The main phases of the developed protocol)

**Servis kayıt aşaması**, IoT Ağ Geçidi üzerinde çalışan servislerin veri tabanına kayıt ettirilmesi aşamasıdır. **Servis keşif aşamasında**, istemcilerin ilgilendikleri servislere nasıl erişileceği sorgulanır. Koordinatör tarafından servise nasıl erişileceği bilgisi istemciye cevap olarak gönderilir. **Veri transferi aşamasında**, koordinatör tarafından verilen erişim bilgisine bağlı olarak, istemci ile ağ geçidi arasında doğrudan iletişim ya da sunucu aracılığı ile iletişim gerçekleştirilir.

#### 4.2. Paket Türleri (Packet Types)

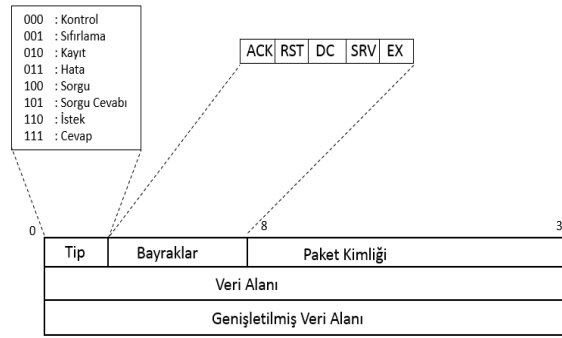
Tasarlanan IoT protokolü sekiz farklı paket içermektedir. Paket tipleri ve işlevleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Paket Tipleri ve Görevleri (Packet types and their functions)

Paket Türü	Açıklama
Kontrol (Control)	Erişilebilirlik kontrolü amacıyla kullanılır.
Sıfırlama (Reset)	Erişim yöntemini sıfırlar.
Kayıt (Register)	IoTGW tarafında sağlanan servisin sunucuya kayıt ettirilmesini sağlar
Hata (Error)	Hata durumunda gönderilir.
Sorgu (Query)	İstemcinin servis keşfi için yaptığı sorgu paketidir.
Sorgu Cevabı (Reply)	Servis keşfi paketine cevap olarak gönderilir.
İstek (Request)	IoTGW tarafından sunulan servisten bilgi isteme paketidir.
Cevap (Response)	İstek paketine cevap olarak gönderilen ve veri içeren pakettir.

#### 4.3. Paket Yapısı ve Başlık Bilgisi (Packet Structure and Packet Header)

Geliştirilen protokolün başlık bilgisi, kolay kullanım sağlamak amacıyla, Şekil 9’da gösterilen alanlardan oluşan bir yapıda tasarlanmıştır.



**Şekil 9.** Hibrit IoT Protokolünün paket başlığı yapısı (Packet header of the Hybrid IoT Protocol)

Toplamda 32-bit olan başlık bilgisindeki 3-bitlik "Tip" alanı, paket türünü göstermektedir. 5-bitlik "Bayraklar" alanı iletişimin sağlıklı çalışması için gerekli olan bayrakları saklar. 24-bitlik "Paket Kimliği" alanı paketin benzersiz kimlik bilgisini içermektedir.

Paket içerisinde yer alan "Veri Alanı" ise, uygulamalarda sensörlerden elde edilen verilerin taşınmasını sağlayan 32-byte uzunluğundaki alandır. "Genişletilmiş Veri Alanı" ise daha büyük boyutlarda veri transferini desteklemek amacıyla geliştirilmiş ve "EX" bayrağına bağlı olarak çalışan, 1024 baytlık ek veri taşıma alanını ifade etmektedir.

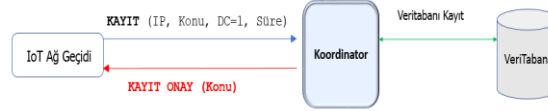
ACK bayrağı, iletişimdeki onay paketlerinde kullanılmaktadır. RST bayrağı, Sıfırlama paketi ile birlikte kullanılan, IoT Ağ Geçidi aracılığıyla doğrudan erişim yetkisini sıfırlamak amacıyla kullanılmaktadır. RST bayrağı set edilmiş paketi alan IoT Ağ Geçidi, doğrudan erişim yetkisini kaybedecektir. Böylece servisten bilgi almak için koordinatör sunucusu aracı olarak kullanılacaktır. DC bayrağı, "1" ise ilgili servise doğrudan erişim sağlanabilir. SRV bayrağı, sunucu kaynaklı trafikleri gösterir. Son bayrak olan EX ise Genişletilmiş Veri Alanının kullanılıp kullanılmayacağını gösterir.

#### 4.4. Protokolün Çalışma Aşamaları (Working Phases of the Protocol)

##### 4.4.1. Servis Kayıt Aşaması (Service Registration Phase)

Bu aşamanın amacı, IoT Ağ Geçitleri tarafından sunulan servislerin ve bu servislere erişim bilgilerinin tutulduğu yerel veri tabanının oluşturulmasıdır. Sisteme kayıt edilmesi gereken sensör sayısı az olduğu durumlarda, elle kayıt yöntemi ya da yarı-otomatik kayıt sistemi kullanılabilir. Ancak bu sayı çok daha fazla olduğu durumlarda, elle kayıt yöntemi verimsiz, pahalı ve iş gücü gerektirecek; çoğu durumda uygulanması imkânsız olacaktır (Kang vd., 2017). Bu nedenle çalışma kapsamında IoT Ağ Geçidine bağlı sensörler tarafından sağlanan hizmetlerin yarı otomatik kayıt edilmesini sağlayan bir mekanizma geliştirilmiştir. Sensör aracılığıyla sunulan sıcaklık, ışık miktarı, nem gibi servisler, konum bilgisi ile birleştirilip IoT Koordinatör yerel veri tabanına kaydedilir.

IoT Ağ Geçidine bağlı sensörün yerel Koordinatör cihazına otomatik kaydedilmesi bu aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamada IoT Ağ Geçidi cihazından sağlanan hizmet, IP adresi, uçtan-uca erişim destekleyip desteklemediği (DC) bilgisi ve önbellekleme süresi koordinatör cihaza gönderilmektedir.



Şekil 10. Geliştirilen protokolün servis kayıt süreci (Service registration process of the developed protocol)

Lab1 konumunun Sıcaklık servisi için örnek *Kayıt* paketinin yapısı ve bu pakete verilen *Kayıt Onay* cevabının yapısı Şekil 10'da gösterilmiştir.

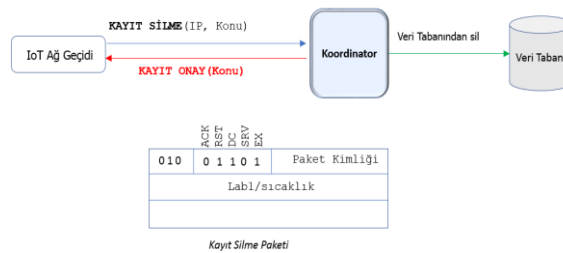


Şekil 11. Kayıt ve Kayıt Onay paketlerinin başlık yapıları (Header of Registration and Registration Ack packets)

Şekil 11'deki örneğe göre, "Lab1/Sıcaklık" servisi, doğrudan erişimi desteklemekte ve bu servis tarafından gönderilen bilgi koordinatör sunucunun ön belleğinde 10 saniye boyunca tutulmaktadır. Bu süre içerisinde aynı servis için gelen tüm veri talepleri, tekrar sensör düğümüne sorgulanmadan doğrudan koordinatör önbelleğinden alınarak istemciye gönderilir.

Konu, önbellek süresi ve DC bilgisini alan sunucu, bu bilgileri ve IoT Ağ Geçidinin IP bilgisini veri tabanına kaydeder. Kayıt işlemimin ardından, koordinatör tarafından IoT Ağ Geçidinde *Kayıt Onay* paketi gönderilir.

Geliştirilen protokolün servis kayıt sürecinde tüm bilgiler Koordinatörde yer alan veri tabanında tutulmaktadır. Bu durum tek bir hata noktasının oluşmasına neden olduğundan, koordinatörün devre dışı kalması durumunda servis keşif sorgularına cevap verilemeyecektir. Bu problemin önüne geçilebilmesi için IoT Ağ Geçidi cihazlarda *Otomatik Kayıt* özelliği geliştirilmiştir. Buna göre, kayıt paketine belirli bir zaman diliminde cevap verilmediği takdirde, IoT Ağ Geçidi, servis keşif isteklerine doğrudan cevap verecek şekilde kendisini ayarlamaktadır.



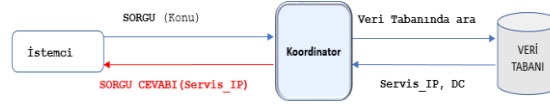
Şekil 12. Kayıt silme süreci ve paket yapısı (De-register process and its packet)

IoT Ağ Geçidi tarafından sunulan servisin devre dışı kalması durumunda, kayıt işleminin iptal edilmesi gerekir. Bu durumda ağ geçidi, ilgili servise ilişkin RST biti set edilmiş özel *Kayıt* paketi gönderir. Paketi alan Koordinatör, bu servise ait erişim bilgilerinin veri tabanından siler ve IoT Ağ Geçidine *Kayıt Onay* paketi ile cevap verir. Şekil 12'deki örnekte "lab1/Sıcaklık" servisine ilişkin kayıt silme paketinin yapısı gösterilmektedir.



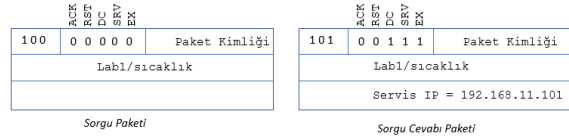
#### 4.4.2. Servis Keşif Aşaması (Service Query Phase)

IoT'nin başarılı bir şekilde uygulanmasına yönelik potansiyelinden tam olarak yararlanmak için, mevcut kaynakların sorunsuz ve otomatik olarak keşfedilmesine ve IoT cihazının erişim bilgisinin dinamik olarak bulunmasına ihtiyaç vardır. MQTT yapısında servis keşif özelliği olmamasına karşın, CoAP protokolünde servis keşfi için Tekdüzen Kaynak Tanımlayıcıları (Uniform Resource Identifiers-URI) yapısı kullanılmaktadır (Kim vd., 2016). Önerilen protokolde, istemci erişmek istediği servise ilişkin “konu” bilgisini “Sorgu” paketleri ile sorgular. İstemci ile sunucu arasındaki iletişimde, istemci tarafından ihtiyaç duyulan konuma ve servise ilişkin sorgu Şekil 13’de gösterilmiştir.



Şekil 13. Servis keşif sürecinin yapısı (Structure of the service query process)

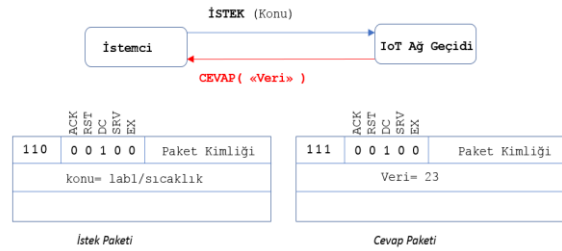
İstemci tarafından sorgulanan konuya ilişkin veri, koordinatör veri tabanında sorgulanır ve servisin hangi IP tarafından sağlandığı istemciye bildirilir. İlgili servis doğrudan iletişimi destekliyse IoT Ağ Geçidinin IP adresi; doğrudan iletişim desteklenmiyor ise Koordinatörün IP adresi cevap olarak gönderilir. Şekil 14’deki örnekte istemci tarafından gönderilen “Sorgu” ve Koordinatör tarafından cevap olarak verilen “Sorgu Cevabı” paketlerinin başlık yapısı gösterilmiştir.



Şekil 14. Sorgu paketi ve sorgu cevap paketinin yapısı (Query and reply packet structure)

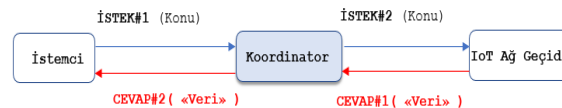
#### 4.4.3. Veri transferi aşaması (Data Transfer Phase)

Bu aşamada “konu” bilgisine göre veri talebi gerçekleştirilmektedir. Önerilen protokolün hibrit yapısı gereği, veri talebi doğrudan sensör düğümü olan Ağ Geçidinden sağlanabildiği gibi (Şekil 15), Koordinatör sunucu aracılığı ile de (Şekil 16) gerçekleştirilebilir.



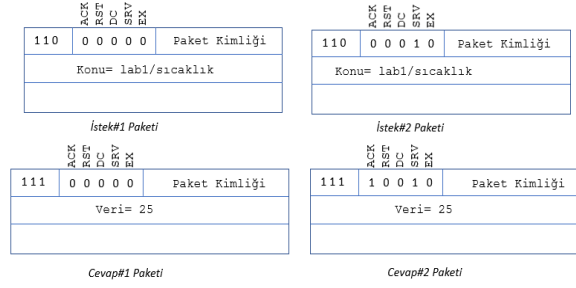
Şekil 15. Sensör düğümüne doğrudan erişim süreci ve kullanılan paketler (Process of direct access to the sensor node and related packets)

Hangi erişim yönteminin desteklendiği, *Servis Kayıt* aşamasında belirlenmektedir. Doğrudan IoTGW erişimi için paket yapısı ve örnek içeriği Şekil 15’de verilmiştir. İstemcinin gönderdiği *İstek* mesajına, içerisinde sorgulanan servise ilişkin veri barındıran *Cevap* paketi ile geri bildirimde bulunulur. Hibrit protokolün desteklediği diğer bir yöntem olan sunucu tabanlı iletişimin modellenmesi ise Şekil 16’da gösterilmiştir.



Şekil 16. Sunucu aracılığı ile veri transferi süreci (Data transfer process via server)

Sunucu tabanlı iletişimde, istemcinin doğrudan IoT Ağ Geçidine ulaşmasına izin verilmemektedir. Bu nedenle servisten veri talebi koordinatör aracılığı ile yapılır. Koordinatör, “konu” bilgisine göre istemciye gelen *İstek* paketini alır ve IoT Ağ Geçidine gönderir. IoT Ağ Geçidinden gelen *Cevap* paketi de yine koordinatör aracılığıyla istemciye gönderilmektedir. Sunucu tabanlı iletişimde sensör düğümü yalnızca paket başlığında “SRV” bayrağı “0” olarak işaretlenmiş paketleri dikkate almaktadır.



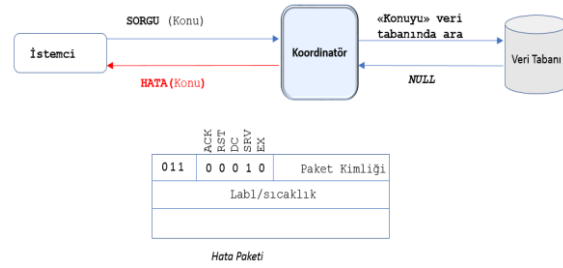
Şekil 17. Sunucu tabanlı iletişimde kullanılan istek ve cevap paketleri (Request and response packets used in server based communication)

Sunucu tabanlı iletişimlerde kullanılan paketlerin başlık bilgisi ve örnek içeriği Şekil 17’de verilmiştir. Koordinatör sunucu aracılığı ile iletişimde, istemci bir servise erişmek istediğinde sunucuya bağlanmak zorundadır. Bu servis ile ilgili tüm iletişim koordinatör aracılığıyla gerçekleşmektedir. Servis kayıt sürecinde belirlenen ön bellek süresine göre, verinin ne kadar süre ile geçerli olacağını belirlenmiştir. Koordinatör önbellek süresi boyunca veriyi saklamaktadır. Bu süre içerisinde aynı servis için gelen diğer *İstek* mesajları, sensör düğümüne gönderilmeden doğrudan ön bellekten alınarak cevaplandırılmaktadır.

#### 4.5. Yardımcı Paketler (Utility Packets)

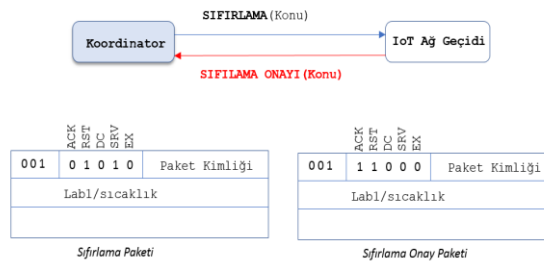
Ana işlevselliği sunan beş paketin yanında işlevselliği arttırmak amacıyla *Hata*, *Sıfırlama* ve *Kontrol* paket türleri kullanılmaktadır.

**Hata Paketi (Error packet);** Sunucuda yer alan yerel kaynak veri tabanında sorgulanan *konuya* ilişkin bir kayıt bulunmadığı, servise erişim olmaması, veri tabanına kayıt yapılmadı gibi hata durumlarında istemciye gönderilmektedir. Her bir hataya ilişkin “hata kodları” yine paket içerisinde gönderilir. Hata paketinin örnek işleyişi ve paket başlık yapısı Şekil 18’de verilmiştir.



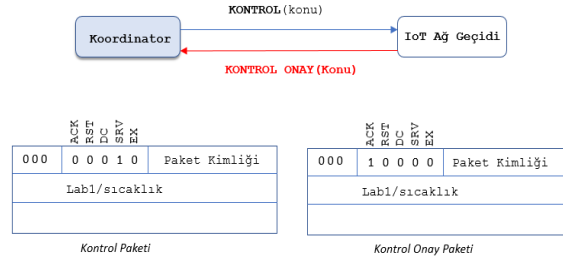
Şekil 18. Hata süreci ve kullanılan paket yapısı (Error process and its packet structure)

**Sıfırlama Paketi (Reset Packet):** IoT Ağ Geçidi cihazının hangi erişim türünü desteklediği, Servis Kayıt aşamasında belirlenmekte ve bu değer sürekli olarak sabit kalmaktadır. Ancak ağın anlık durumuna göre doğrudan erişim yönteminin iptal edilmesi gerekebilir. Bu durumda koordinatör tarafından, erişim yönetiminin değiştirilmesi için *Sıfırlama* paketi gönderilmektedir. *Sıfırlama* paketinin iletişim şekli ve paket yapısı Şekil 19’da gösterilmiştir. Bu paketi alan IoT Ağ Geçidi, doğrudan erişim yöntemini kaybetmektedir.



Şekil 19. Sensör düğümünün erişim yönteminin değiştirilmesi (sıfırlama) süreci ve paket yapısı (The process of changing (reset) the access method of the sensor node and the its packet structure)

**Kontrol Paketi (Control Packet):** IoT Ağ Geçidi üzerinde yer alan servisin erişilebilir olup olmadığını kontrol etmek için kullanılan doğrulama mesajlarıdır. Şekil 20’de paket yapısı gösterilen kontrol paketlerine kontrol onayı mesajları ile cevap verilmektedir.



Şekil 20. Kontrol paketi ve başlık yapısı (Control packet and its packet header)

Kontrol mesajlarının diğer bir avantajı da gönderilen mesaja verilen onay mesajları aracılığıyla servise erişim süresinin de hesaplanabilmesidir. Kontrol mesajlarına cevap alınmadığı takdirde, ilgili servisin devre dışı kaldığı varsayılır ve koordinatörün veri tabanından silinir. Aynı şekilde, Kontrol mesajları IoT Ağ Geçitlerine ulaşmadığında koordinatörün devre dışı kaldığı varsayılır ve sensör düğümleri doğrudan erişim durumuna geçmektedir.

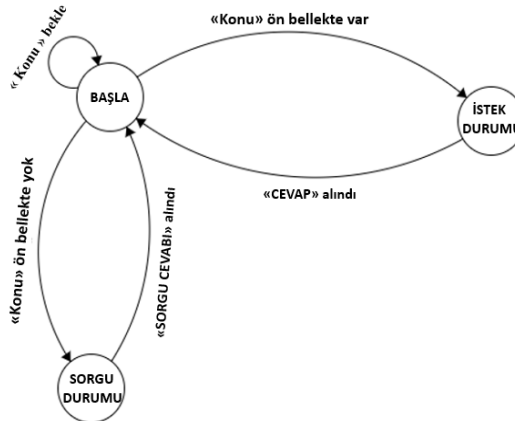
#### 4.6. Geliştirilen Protokoldeki Bileşenler (Components of the Developed Protocol)

Daha önceki bölümde değinildiği gibi, protokolün önerilen mimarisinde Koordinatör, İstemci yazılımı ve IoT Ağ Geçidi düğümü olmak üzere üç bileşen bulunmaktadır. Bu bölümde bu bileşenlerin çalışma prensipleri akış diyagramları ile ifade edilmektedir.

##### 4.6.1. İstemci Yazılımı (Client Software)

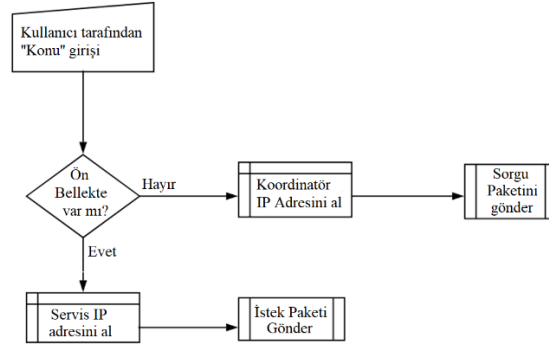
Ağdaki bir konuma ve servise ilişkin veri talep eden, sensör ile etkileşim kurmak isteyen uygulamadır. MQTT ve AMQP yapısındaki herhangi bir konuya abone olan istemciye benzetilebilir. MQTT yapısında, trafiği başlatan taraf yayıncıdır ve genellikle abonenin o an bilgiye ihtiyacı olup olmamasına bakılmaksızın sensöre ilişkin veri aboneye gönderilir. Ancak, önerilen mimaride trafiği başlatan taraf, istemci tarafıdır. Veriye ihtiyaç duyulduğu an veri talebi, istemci tarafından başlatılmaktadır.

İstemci "konu" ile belirlenen servise nasıl erişebileceğine ilişkin sorguyu yapar. Koordinatörden gelen *Sorgu Cevabında* servis kaynağının erişim bilgisi bulunmaktadır. İstemci "konu" ile erişim bilgilerini eşleştirir ve ön bellekte saklar. Daha sonra bu servise ilişkin veri talebi yapılacağı zaman tekrar Sorgu yapılmasına gerek kalmaksızın doğrudan veri isteme aşamasına geçmekte ve sensör düğümünden cevabının gelmesini beklemektedir. Şekil 21'de istemci yazılımının akış diyagramı gösterilmiştir.



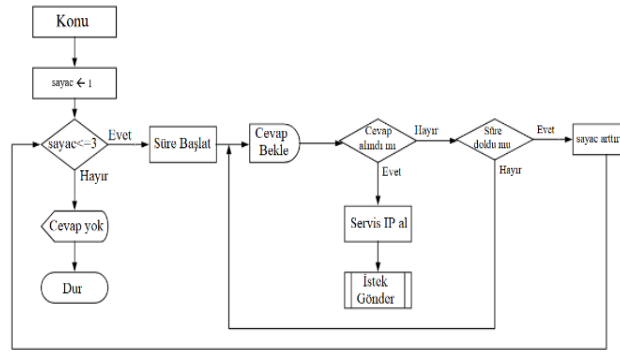
Şekil 21. İstemci yazılımı akış diyagramı (Client software flow diagram)

İstemci yazılımı, veri talep edilen "konu" bilgisinin ön bellekte bulunup bulunmama ve koordinatörden *Sorgu cevabı* paketinin gelip gelmemesi durumuna göre, *sorgu* durumuna veya *istek* durumuna geçmektedir. Kullanıcı tarafından sorgulanmak istenen "konu", öncelikli olarak ön bellekte aranır. Ön bellekte sorgulanan konu bilgisine ilişkin bir kayıt varsa, servisi veren donanım aygıtının IP adres bilgisi ön bellekten alınmaktadır. Bu durumda veri talebi aşaması olan *İstek* durumuna geçilmektedir. Ancak ön bellekte istenen konu için kayıt yoksa, hizmeti sunan IoT Ağ Geçidinin IP adresini sorgulaması gerekmektedir ve *sorgu* durumuna geçmektedir.



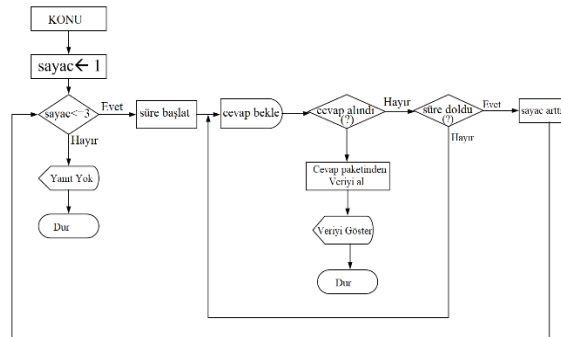
Şekil 22. İstemci yazılımı başlangıç durumu akış diyagramı (Initial state flow diagram of client software)

İstemci yazılımının başlangıç durumuna ilişkin akış diyagramı Şekil 22’de verilmiştir. Diyagramda yer alan *Sorgu Paketini Gönder* ve *İstek Paketi Gönder* süreçleri modülerlik sağlamak amacıyla ayrı akış diyagramları olarak sunulmuştur.



Şekil 23. Sorgu gönderimi akış diyagramı (Flow diagram of sending query)

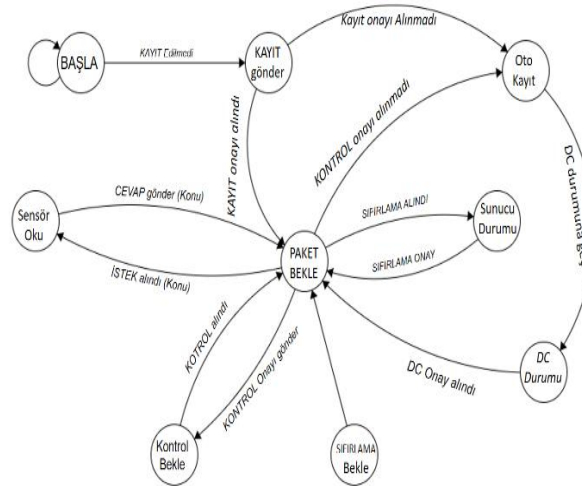
“Konu” bilgisini göre sorgulama süreci, istemciden gönderilen *Sorgu* paketi tarafından yapılmaktadır. Bu sürecin akış diyagramı Şekil 23’te gösterilmiştir. Sorguya verilen *Sorgu Cevabı* mesajında *Servis IP* adres bilgisi bulunmaktadır. Bu bilgiler, daha sonra tekrar kullanılmak amacıyla istemcinin ön belleğinde tutulmaktadır. Akış diyagramından da görüleceği üzere, sorgulama için belirli bir süre beklenmektedir. Bu süre içerisinde *Sorgu Cevabı* alınmazsa, süreç 2 kez tekrar edilmektedir. Toplamda 3 kez *Sorgu Cevabı* alınmadığı takdirde, cevabın alınmadığına ilişkin yazılım bilgilendirilmektedir. Cevap alındığında ise, istemci yazılımı *İstek Gönderim* durumuna geçmektedir.



Şekil 24. İstek gönderimi akış diyagramı (Flow diagram of sending request)

*İstek* durumunda, IoT Ağ Geçidi ya da Koordinatör’den gelen bilgiler *Cevap* paketlerinde yer almaktadır. *Sorgu* durumunda olduğu gibi, *İstek* durumunda da 3 kez işlem tekrar edilmektedir. Her bir işlem için 2 saniye bekleme süresi bulunmaktadır. Bu süreç içerisinde *Cevap* paketi alındığında, paket içerisinde veriler alınıp ve istemci yazılımına gönderilmektedir. Aksi durumda yazılıma “yanıt yok” bilgisi verilmektedir. Bu durum, Şekil 24’te akış diyagramı ile gösterilmiştir.



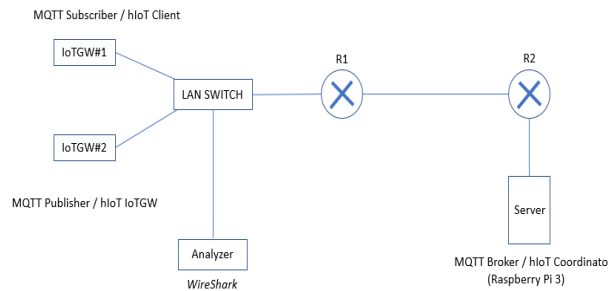


Şekil 26. IoT Ağ Geçidi akış diyagramı (Flow diagram of IoT Gateway)

Diyagramda belirtildiği gibi, IoT Ağ Geçidinin Koordinatör ile sürekli iletişim halinde olduğu *Kontrol* mesajları ile doğrulanmaktadır. Ancak Koordinatör, sunucu tabanlı iletişimde tek bir hata noktası oluşturmaktadır. Bu nedenle, sunucunun devre dışı kalıp kalmadığı sürekli olarak doğrulanmalıdır. Periyodik olarak gönderilen *Kontrol* mesajları sayesinde sunucunun erişilebilir olduğu kontrol edilmektedir. Sunucunun erişilebilirliği sağlanmazsa, IoT Ağ Geçidi *Otomatik Kayıt* durumuna geçmekte ve doğrudan erişimi (DC =1) desteklemektedir. Böylece istemci tarafından sorgulanan *Sorgu* ve *İstek* paketlerine de cevap verebilmektedir. Hibrit protokolün çalışma mantığı gereği, hizmet sunan IoT Ağ Geçidi doğrudan erişim durumunda (DC) olduğunda, koordinatörden gelen *Sıfırlama* paketi ile doğrudan erişim yetkisini kaybedip, sunucu bazlı çalışma moduna (Sunucu durumu) geçmektedir.

## 5. Başarım Değerlendirmesi (Performance Evaluation)

Geliştirilen protokolünün başarım değerlendirme için laboratuvar ortamında diğer ağ trafiklerinden izole edilmiş kapalı sistem bir topoloji hazırlanmış ve IoT uygulamalarında sıklıkla kullanılan MQTT protokolü ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 27. Gerçek ortam değerlendirmesinin yapıldığı topoloji (Experimental topology developed for performance testing)

Şekil 27'de belirtilen topolojide, IoT Ağ Geçidi cihazları olarak Arduino Uno; sunucu olarak Raspberry Pi 3 donanımları kullanılmıştır. Sunucu, hIoT protokolünün mimarisinde *koordinatör* olarak; MQTT mimarisinde ise sunucu (MQTT Broker) olarak kullanılmıştır. MQTT broker sunucusunda açık kaynak "*Mosquitto*" kullanılmıştır (Johnsen vd., 2018). Hibrit IoT protokolünde ise sunucuda Python betikleri, veri tabanı olarak ise SQLite kullanılmıştır. Topolojide, farklı bant genişliklerinin etkisini yansıtmak amacıyla, sunucu ile IoT Ağ geçidi cihazları arasında R1 ve R2 ile gösterilen yönlendiriciler kullanılmıştır.

### 5.1. Bant Genişliğine Bağlı Gecikme Karşılaştırması (Delay Comparison by bandwidth)

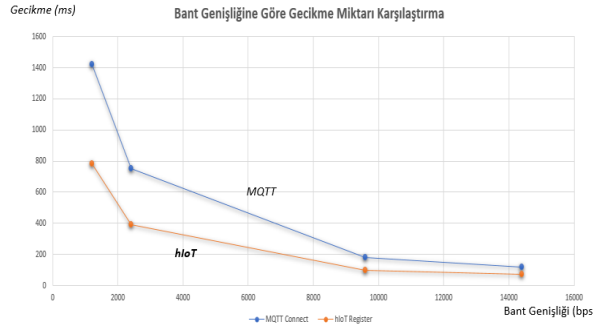
Geliştirilen Hibrit IoT protokolünün *Kayıt* aşaması ile, MQTT yapısındaki *Connect* aşaması, her ikisinde de sunucuya kayıt işlemi gerçekleştiğinden, işlevsellik açısından benzerlik göstermektedir. Şekil 27'de geliştirilen topolojide, R1-R2 arasındaki bant genişliği her senaryo için değiştirilmiş ve her bir bant genişliği için MQTT-Connect aşamasındaki ortalama gecikme değeri ile hIoT - Kayıt aşamasının ortalama gecikme değerleri hesaplanmıştır. Topolojide IoTGW cihazlarından gönderilen ve alınan tüm trafiklerin bir kopyası WireShark yazılımı ile yakalanmış ve yakalanan paketlere göre ortalama değerler elde edilmiştir. WireShark ile yakalanan

paketlerden elde edilen bilgilere göre, altı farklı bant genişliği için ortalama süreler milisaniye cinsinden Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** MQTT-Connect ve hIoT-Kayıt süreçlerinin farklı bant genişliklerindeki gecikme değerleri (Delay values of MQTT-Connect and hIoT-Register processes at different bandwidths)

Bant Genişliği (bps)	Gecikme Süreleri (ms)	
	MQTT (Connect)	Hibrit IoT (Kayıt)
1200	1423	782
2400	753	390
9600	182	100
14400	121	68
64000	26	41
128000	16	11

MQTT protokolünde sunucuya kayıt için öncelikle TCP 3-Yollu El Sıkışma işleminin (3-way handshake) işleminin gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu işlemin ardından Connect ve Connect-ACK paketleri ile sunucuya bağlantı sağlanmaktadır. MQTT *Connect* aşaması ile, hIoT protokolünde bu aşamaya benzer olan “*Kayıt*” (hIoT-Register) aşamalarının gecikme süreleri Şekil 28’de verilmiştir.



**Şekil 28.** Bant genişliğine göre gecikme değerleri karşılaştırması (Delay comparison by bandwidth)

Grafikte gösterilen MQTT ve hIoT iletişiminden görüleceği üzere, düşük bant genişliklerinde hIoT protokolü daha düşük gecikme değerine sahiptir. Önerilen protokolle UDP kullanılması ve paket başlığının sade yapısı nedeniyle, kısıtlı kaynaklara sahip cihazlarda kullanımı daha uygun olmaktadır. Bu durum, iletişimin daha hızlı olmasını sağlamaktadır. IoT ekosisteminde hız gerektiren uygulamalarda hIoT protokolü, MQTT protokolüne göre hız açısından daha yüksek performans göstermektedir. Ancak bant genişliği arttığında, her iki protokolün gecikme süreleri arasındaki fark kapanmaktadır.

## 5.2. Yük Miktarına Göre Gecikme Değerleri (Delays by Payload)

Aynı topoloji üzerinde veri transferi başarımlı değerlendirilmesi için yapılan karşılaştırmada ise, farklı yük değerleri için ortalama gecikmeler hesaplanmıştır. Buna göre IoTGW#1 MQTT “Abone” olarak; IoTGW#2 ise MQTT “Yayıncı” olarak tasarlanmıştır. Aynı topolojide IoTGW#1 hIoT İstemcisi, IoTGW#2 ise Ağ Geçidi olarak tasarlanmıştır. Farklı paket boyutları için MQTT yayıncıdan gönderilen 30 mesajın, MQTT aboneye ulaşma süreleri WireShark yazılımı ile yakalanmış ve ortalama süre hesaplanmıştır.

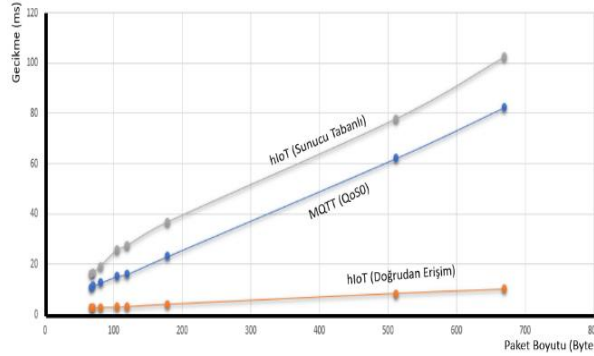
Aynı şekilde, *İstek* paketinin hIoT istemcisinden gönderilmesi ile *cevap* paketinin istemciye ulaşması arasındaki süreler 30 paket için ortalama olarak hesaplanmıştır. hIoT protokolünde, doğrudan erişim için ortalama süre ile sunucu üzerinden gerçekleşen iletişim için ortalama süreler ayrı ayrı hesaplanmış ve milisaniye cinsinden Tablo 3’te verilmiştir.



**Tablo 3.** Farklı yük miktarlarına göre veri transferi karşılaştırması (Data transfer comparison by different payloads)

Yük Miktarı (Bayt)	Gecikme Süreleri (ms)		
	MQTT (Publish-Subscribe)	hIoT (İstek-Cevap) Doğrudan erişim	hIoT (İstek-Cevap) Sunucu Tabanlı
68	10,7	2,5	15,8
70	11,3	2,5	16,2
81	12,5	2,7	19,1
105	15,2	2,8	25,5
120	16	3	27,5
179	23,1	4	36,7
512	62	8,2	77,8
670	82,2	9,9	102,4

Tablodaki değerlere göre yük miktarı ve gecikme değerleri Şekil 29'daki grafikte verilmiştir.

**Şekil 29.** Taşınan yük miktarlarına göre veri transferinde yaşanan gecikme değerleri (Delays in data transfer according to the payload)

Görüleceği üzere, geliştirilen hIoT protokolünde doğrudan erişim MQTT QoS0'a göre daha düşük gecikme değerlerine sahiptir. MQTT protokolünde, yayıncıdan gönderilen mesaj öncelikle sunucuya gönderilmekte, ardından sunucu tarafından aboneye iletilmektedir. Sunucu, abone ile yayıncı arasında ek bir sekme oluşturduğundan gecikme artmaktadır. Oysa hIoT protokolünde doğrudan iletişim sağlandığından, sunucudan kaynaklanan gecikmeler iletişime yansımamaktadır. Geliştirilen protokolün sunucu tabanlı iletişiminde ise MQTT'ye oranla daha yüksek gecikmeler ortaya çıkmaktadır.

Gecikmelerin hassas olduğu servisler için doğrudan erişim yöntemi tercih edilebilir. Gecikmenin görece olarak önemsiz olduğu ancak sunucu üzerinden erişim kontrolünün yapılması gerektiği durumlarda ise sunucu tabanlı iletişim daha uygun olacaktır.

### 5.3. Servis Keşif Süreci Karşılaştırma (Service Query Process Comparison)

IoT ekosisteminde kullanılan cihazlar, birçok nesne ve fiziksel ortam ile etkileşim halindedir. Böyle bir ortamda istenilen servislerin keşfedilmesi için efektif bir keşif mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla Klaucek ve Kirsche tarafından, kısıtlı kaynaklara sahip cihazlar için mDNS ve DNS-SD kombinasyonu bir sistem geliştirilmiştir. Adı geçen çalışmada MQTT ve CoAP protokolünün uçtan-uca iletişim sağlayamadığı, mesajların dönüştürülmesi gerektiği ve bu nedenle gecikmeye neden olduğu, hata olasılığının bulunduğu ve işlemin karmaşık olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen Hibrit IoT protokolünün önemli özelliklerinden biri de ek bir protokol kullanımına ihtiyaç olmadan "Servis Keşif" mekanizmasını barındırmasıdır. hIoT protokolünün "Kayıt" aşamasında koordinatör sunucuya kayıt ettirilen servisler, servis keşif aşamasındaki "Sorgu" paketleri ile sorgulanır. Şekil 27'de gösterilen topolojide farklı bant genişlikleri için servis keşif sorgularına verilen cevaplara ait gecikme süreleri milisaniye cinsinden Tablo 4'te verilmiştir.



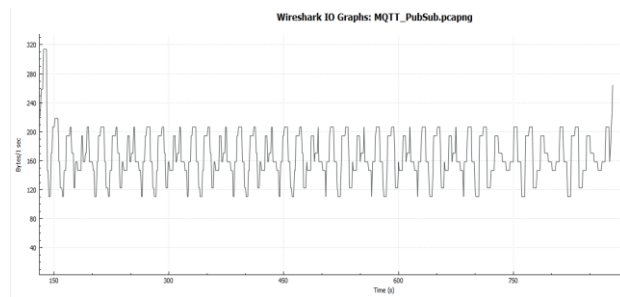
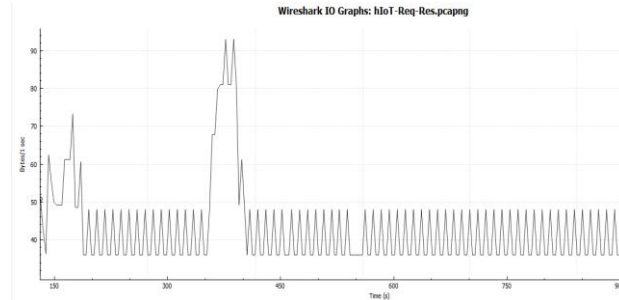
**Tablo 4.** Farklı bant genişlikleri için servis keşif süreci gecikme değerleri (Service query delays for different bandwidths)

Bant Genişliği (bps)	Servis Keşif Süresi (ms)
1200	890
2400	384
9600	99
14400	67
64000	18
125000	15

Klauck ve Kirsche'nin geliştirmiş oldukları sistemde (Klauck & Kirsche, 2012), 2 sekme (hop count) için gecikme değeri 1954 ms olduğu belirtilmiştir. Geliştirilen hIoT protokolünde ise servis keşfi en az 890 ms olarak ölçülmüştür. hIoT protokolü, kampüs ağları gibi sınırlı alanlarda "konu" bazlı olarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sınırlılık nedeniyle hIoT internet ortamında kullanılamasa da, karmaşık DNS çözümlerine göre yerel ağlarda kullanımı uygun olacaktır.

#### 5.4. Bant Genişliği Kullanımı Karşılaştırması (Bandwidth Usage Comparison)

Hazırlanan topoloji üzerinde, MQTT ve hIoT protokolü için sabit aralıklara veri transferi yapılmış ve gönderilen tüm paketler WireShark ile yakalanmıştır. Her iki protokolün bu süre içerisinde toplam bant genişliği kullanımı Şekil 30 ve Şekil 31'de gösterilmiştir.

**Şekil 30.** MQTT Bant genişliği kullanımı (Bandwidth usage in MQTT)**Şekil 31.** hIoT bant genişliği kullanımı (Bandwidth usage in hIoT)

Hibrit IoT protokolünün MQTT'ye göre veri transferinde daha az bant genişliği kullanarak, sensör düğümler ile iletişime geçtiği şekilde grafiklerden görünmektedir. MQTT protokolü TCP tabanlı olduğundan, veri iletişimde daha fazla paket akışı gerçekleşmektedir. Diğer taraftan, geliştirilen hibrit protokol UDP tabanlı olduğundan, TCP'ye göre daha küçük başlık bilgisi taşımaktadır. Başlık bilgisinin boyutunun daha küçük olması ve kullanılan paket akışlarının daha az olması, daha düşük bant genişliği kullanımını sağlamaktadır. Daha az bant genişliği kullanımı, sensör düğümlerinin de verimli kullanımını sağlamaktadır.

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

IoT ekosisteminde nesnelere gelen veriler, uygulamalara göre farklılık göstermektedir. Ancak IoT uygulamalarında transfer edilen veriler genellikle düşük ve sınırlı boyuttadır (Nóbrega vd., 2019). Sensörlerden elde edilen düşük boyuttaki verilerin taşınması için geliştirilen hIoT protokolü, UDP tabanlı ve küçük paket başlığına sahiptir. Thangavel ve arkadaşlarının çalışmasında UDP tabanlı protokolün daha düşük ek yük getirdiği ifade edilmiştir (Thangavel vd., 2014). Nesnelere İnternetinde kullanılan cihazlar, kısıtlı bellek, işlemci ve güç gibi

düşük kaynaklara sahip olduğu göz önüne alındığında, düşük ek yük, kaynakların verimli kullanımına da katkı sağlamaktadır.

Gecikme sürelerinin düşük olması, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda önemli bir kriter olarak görülebilir. Jürgen ve arkadaşlarının çalışmasında IoT ortamlarında UDP tabanlı iletişimlerin TCP tabanlı iletişimlere oranla daha düşük RTT değerine sahip olduğu ifade edilmektedir (Lars, 2015). Geliştirilen hibrit IoT protokolü, doğrudan iletişim yönteminde, MQTT protokolüne oranla daha düşük gecikme değerlerine sahip olmaktadır.

Yaygın kullanılan IoT protokollerinde, sensörler aracılığıyla nesnelere elde edilen bilgiler sunucuya periyodik olarak gönderilmektedir. Sunucu aracılığıyla da abonelere bu bilgi tekrar yayınlanmaktadır. Bu durum sensörün sürekli kullanımı ve sensör ömrünün görece olarak kısalmaya ve güç tüketiminin artması anlamına gelmektedir. Geliştirilen protokolün kullanılacağı mimariye ise isteğe bağlı iletişim amaçlanmıştır. Böylece güç tüketiminin görece olarak düşürülmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışma kapsamında önerilen hibrit protokolde, veri iletişimde sürekli olarak sunucuya bağımlılık bulunmamakta, ağdaki cihazlar birbirleri ile doğrudan haberleşebilmektedir. Bu sayede tek bir hata noktasının oluşmasını önlenmekte ve trafik yükü dağıtılarak darboğaz oluşumunun önüne geçilmektedir. Yine, merkezi sunucu kullanılan senaryoları da desteklemek amacıyla, sunucu tabanlı da çalışabilecek yapıda tasarlanmıştır. Veriye erişimin hassas ve anlık olması gerektiği durumlarda, sensörler aracılığı ile nesnelere anlık olarak uçtan uca bir şekilde iletişim sağlanabilmektedir.

Heterojen yapıdaki IoT sistemlerde, her servise erişim aynı derecede öneme sahip değildir. Kimi servisler doğrudan iletişim gerektiren kritik öneme sahip iken, kimi servislerde ise bu gecikme telafi edilebilir. Aynı şekilde bazı servislere doğrudan erişim güvenlik ve performans riskleri barındırabileceğinden, aracı yapıların kullanılması daha uygun olabilir. Bu durum ihtiyaçlara, kullanım senaryolarına, güvenlik politikalarına göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada, IoT sistemlerinde yukarıda bahsi geçen çeşitli kullanım senaryolarını desteklemek amacıyla hibrit bir protokol tasarlanmıştır.

Bu çalışmada, servisin doğrudan erişimi destekleyip desteklemediği, servis kayıt aşamasında belirlenmekte ve sürekli olarak sabit kalmaktadır. Ancak, belirlenen trafik kriterlerine göre anlık karar verme algoritmaları geliştirilebilir. Yine çeşitli parametrelere göre, trafik tahmini yapılarak, sunucu bazlı ya da uçtan-uca iletişim arasında dinamik geçişler sağlanmasına yönelik çalışmalar yapılabilir.

IoT ekosisteminde kullanılan cihazların büyük bir kısmı sınırlı kapasitelere sahip olduğundan, protokolün tasarımı sürecinde şifreleme gibi yüksek bellek ve işlemci gücü gerektiren güvenlik özellikleri bu çalışmada kapsam dışına alınmıştır. Teknolojinin gelişmesi ile bu sınırlılıkların giderek azalacağı göz önüne alındığında, protokolde güvenli iletişim sağlamak amacıyla şifreleme, veri bütünlüğü ve kimlik doğrulama çalışmaları yapılabilir.

### **Teşekkür (Acknowledgement)**

Bu çalışma doktora tez çalışmasından türetilmiştir.

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

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

### **Kaynaklar (References)**

- Anjum, A., Ilyas, M. U., Gorden, D., Gar, C., & Guo vd., 2014. Internet of Things – From Research and Innovation to Market Deployment. (O. Vermesan & P. Friess, Eds.) Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics) (Vol. 6). River Publishers.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G., 2010. The Internet of Things: A Survey. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 54(15), 2787–2805. <http://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Bellavista, P., & Zanni, A., 2016. Towards better scalability for IoT-cloud interactions via combined exploitation of MQTT and CoAP. 2016 IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a Better Tomorrow, RTSI 2016. <http://doi.org/10.1109/RTSI.2016.7740614>
- Chen, Y., & Kunz, T., 2016. Performance evaluation of IoT protocols under a constrained wireless access network. In 2016 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking, MoWNeT 2016. <http://doi.org/10.1109/MoWNeT.2016.7496622>
- Choi, D., Jung, J., Kang, H., & Koh, S., 2017. Cluster-based CoAP for Message Queueing in Internet-of-Things Networks, 584–588.
- Collina, M., Bartolucci, M., Vanelli-Coralli, A., & Corazza, G. E., 2014. Internet of Things application layer protocol analysis over

- error and delay prone links. In 2014 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop, ASMS/SPSC 2014 (s. 398–404). <http://doi.org/10.1109/ASMS-SPSC.2014.6934573>
- Dizdarevic, J., Carpio, F., & Jukan, A., 2018. Survey of Communication Protocols for Internet-of-Things and Related Challenges of Fog and Cloud Computing Integration. *CoRR*, 1(1), 1–27.
- Florea, I., Rughinis, R., Ruse, L., & Dragomir, D., 2017. Survey of Standardized Protocols for the Internet of Things. *Proceedings - 2017 21st International Conference on Control Systems and Computer, CSCS 2017*, 190–196. <http://doi.org/10.1109/CSCS.2017.33>
- Fortino, G., Guerrieri, A., Russo, W., & Savaglio, C., 2014. Integration of agent-based and Cloud Computing for the smart objects-oriented IoT. *Proceedings of the 2014 IEEE 18th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, CSCWD 2014*, 493–498. <http://doi.org/10.1109/CSCWD.2014.6846894>
- Grygoruk, A., & Legierski, J., 2016. IoT gateway – implementation proposal based on Arduino board. In *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science (Vol. 8, s. 1011–1014)*. <http://doi.org/10.15439/2016F283>
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M., 2013. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <http://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Gündoğan, C., Kietzmann, P., Lenders, M., Petersen, H., Schmidt, T. C., & Wählisch, M., 2018. NDN, CoAP, and MQTT: A Comparative Measurement Study in the IoT. <http://doi.org/arXiv:1806.01444v2>
- Höller, J., Tsiatsis, V., Mulligan, C., Karnouskos, S., Avesand, S., & Boyle, D., 2014. Part III. IoT Use Cases. From Machine-To-Machine to the Internet of Things, 233–235. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-407684-6.00033-4>
- Huo, C., 2014. A Centralized IoT Middleware System for Devices Working Across Application Domains Using Self-descriptive Capability Profile. *Doktora Tezi, California Üniversitesi*.
- Ishaq, I., Carels, D., Teklemariam, G., Hoebeke, J., Abeele, F., Poorter, E., vd., 2013. IETF Standardization in the Field of the Internet of Things (IoT): A Survey. *Journal of Sensor and Actuator Networks (Vol. 2)*. <http://doi.org/10.3390/jsan2020235>
- ITU-T. (2014). Focus Group on M2M service layer: APIs and protocols overview. Çevrimiçi, <https://www.itu.int/opb/publications.aspx?parent=T-FG&selection=6&sector>, Son Erişim 18.02.2019
- Jara, A. J., Martinez-Julia, P., & Skarmeta, A., 2012. Light-weight multicast DNS and DNS-SD (lmDNS-SD): IPv6-based resource and service discovery for the web of things. *Proceedings - 6th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, IMIS 2012*, 731–738. <http://doi.org/10.1109/IMIS.2012.200>
- Johnsen, F. T., Landmark, L., Hauge, M., Larsen, E., & Kure, O., 2018. Publish/Subscribe Versus a Content-Based Approach for Information Dissemination. In *MILCOM 2018 - 2018 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)* (s. 1–9). <http://doi.org/10.1109/MILCOM.2018.8599786>
- Kang, B., Kim, D., & Choo, H., 2017. Internet of Everything: A Large-Scale Autonomic IoT Gateway. *IEEE Transactions on Multi-Scale Computing Systems*, 3(3), 206–214. <http://doi.org/10.1109/TMSCS.2017.2705683>
- Kim, H., 2017. Securing the Internet of Things via Locally Centralized, Globally Distributed Authentication and Authorization.
- Kim, S. M., Choi, H. S., & Rhee, W. S., 2016. IoT home gateway for auto-configuration and management of MQTT devices. *2015 IEEE Conference on Wireless Sensors, ICWiSE 2015*, 12–17. <http://doi.org/10.1109/ICWISE.2015.7380346>
- Kimsey, T., Jeffords, J., Moghaddam, Y., & Rucinski, A., 2015. An IoT Based Service System as a Research and Educational Platform. *New Trends in Intelligent Information and Database Systems*, 598, (s. 249–257). [http://doi.org/10.1007/978-3-319-16211-9\\_26](http://doi.org/10.1007/978-3-319-16211-9_26)
- Klauck, R., & Kirsche, M., 2012. Bonjour Contiki: A Case Study of a DNS-Based Discovery Service for the Internet of Things. In X.-Y. Li, S. Papavassiliou, & S. Ruehrup (Eds.), *Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks* (pp. 316–329). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lars, D., 2015. Performance Evaluation of M2M Protocols Over Cellular Networks in a Lab Environment. In *Conference: 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks (ICIN), 2015, Paris, Fransa* (s. 70–75). <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1109/ICIN.2015.7073809>
- Luzuriaga, J. E., Perez, M., Boronat, P., Cano, J. C., Calafate, C., & Manzoni, P., 2015. A comparative evaluation of AMQP and MQTT protocols over unstable and mobile networks. In *2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2015* (s. 931–936). <http://doi.org/10.1109/CCNC.2015.7158101>
- M. Koster, & Keranen, A., 2015. Message Queueing in the Constrained Application Protocol (CoAP). Online: <https://tools.ietf.org/html/draft-koster-core-coapmq-00>, Son Erişim: 20.02.2019
- Menyah, N., 2017. A Real Time Demonstrative Analysis Of Lightweight Payload Encryption in Resource Constrained Devices Based on MQTT. *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi*.
- Naik, N., 2017. Choice of Effective Messaging Protocols for IoT Systems : MQTT , CoAP , AMQP and HTTP.
- Ngu, A. H., Gutierrez, M., Metsis, V., & Sheng, Q. Z. (2017). IoT Middleware : A Survey on Issues and Enabling Technologies. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(1), 1–20. <http://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2615180>
- Nóbrega, L., Gonçalves, P., Pedreiras, P., Pereira, J., Nóbrega, L., Gonçalves, P., ... Pereira, J., 2019. An IoT-Based Solution for Intelligent Farming. *Sensors*, 19(3), 603. <http://doi.org/10.3390/s19030603>
- Pathania, N., 2017. Traffic Prioritization in an MQTT Gateway. In *International Journal of Computer Applications (Vol. 164, s. 32–38)*.
- Sasaki, Y., Yokotani, T., & Mukai, H., 2018. Proposals on IoT Communication through MQTT over L2 Network and their Performance Evaluation. In *2018 International Conference on Innovations in Information Technology (IIT)* (s. 30–35).
- Sch, B., Bauer, J., & Aschenbruck, N., 2017. Improving Energy Efficiency of MQTT-SN in Lossy Environments using Seed-based Network Coding. *42nd Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*. <http://doi.org/10.1109/LCN.2017.87>
- Schmitt, A., Carlier, F., & Renault, V., 2018. Dynamic bridge generation for IoT data exchange via the MQTT protocol. *Procedia Computer Science*, 130, 90–97. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.016>
- Shelby, Z., Hartke, K., & Bormann, C., 2014. The Constrained Application Protocol (CoAP). Online: <http://doi.org/10.17487/rfc7252>, Son Erişim: 20.02.2019

- Shin, I.-J., Song, B.-K., & Eom, D.-S., 2017. International Electrotechnical Commission (IEC) 61850 Mapping with Constrained Application Protocol (CoAP) in Smart Grids Based European Telecommunications Standard Institute Machine-to-Machine (M2M) Environment. *Energies*, 10(3), 393. <http://doi.org/10.3390/en10030393>
- Su, P. H., Shih, C., Hsu, J. Y., Lin, K., & Wang, Y., 2014. Decentralized Fault Tolerance Mechanism for Intelligent IoT / M2M Middleware. In 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT) (s. 45-50).
- Talaminos-Barroso, A., Estudillo-Valderrama, M. A., Roa, L. M., Reina-Tosina, J., & Ortega-Ruiz, F., 2016. A Machine-to-Machine protocol benchmark for eHealth applications - Use case: Respiratory rehabilitation. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 129, 1-11. <http://doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.03.004>
- Tantitharanukul, N., Osathanunkul, K., Hantrakul, K., Pramokchon, P., & Khoenkaw, P., 2016. MQTT-Topics Management System for sharing of Open Data, 1-6.
- Thangavel, D., Ma, X., Valera, A., Tan, H. X., & Tan, C. K. Y., 2014. Performance evaluation of MQTT and CoAP via a common middleware. In IEEE ISSNIP 2014 - 2014 IEEE 9th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, Conference Proceedings. <http://doi.org/10.1109/ISSNIP.2014.6827678>
- Thota, P., & Kim, Y., 2016. Implementation and Comparison of M2M Protocols for Internet of Things. In 2016 4th Intl Conf on Applied Computing and Information Technology/3rd Intl Conf on Computational Science/Intelligence and Applied Informatics/1st Intl Conf on Big Data, Cloud Computing, Data Science Engineering (ACIT-CSII-BCD) (s. 43-48). <http://doi.org/10.1109/ACIT-CSII-BCD.2016.021>



## ÇİMENTO VE UÇUCU KÜL BÜNYESİNDEKİ AĞIR METALLERİN ETKİLERİNİN HİDRATASYON VE ÇEVRE SAĞLIĞI AÇISINDAN İNCELENMESİ

Gökhan KAPLAN<sup>1\*</sup>, A. Uğur ÖZTÜRK<sup>2</sup>, A. Büşra UĞUR KAPLAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kastamonu, Türkiye

<sup>2</sup> Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye

<sup>3</sup> Atatürk Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Eczacılık Teknolojisi Bölümü, Erzurum, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Ağır Metal, Uçucu Kül, Çevre Sağlığı, Çimento, Hidratasyon.</i>	Çimento, beton üretimi içine kullanılan kalsiyum esaslı bağlayıcıların başında gelmektedir. Ayrıca uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi endüstriyel atıkların çimento yerine kullanımı da her geçen gün artmaktadır. Günümüzde uçucu kül gibi endüstriyel atıkların beton ve çimento sektöründe kullanılması ile çevresel problemler azaltılmaktadır. Ancak çimento ve uçucu kül bünyesinde Pb, Cu, Sn, Cr, As, Mo, V, Co ve Cd gibi insan sağlığı açısından zararlı olan ağır metaller bulunmaktadır. Ağır metaller, DNA parçalanması, kromozom bozuklukları, cilt lezyonları, solunum ve sinir sisteminde kalıcı hasarlara yol açmaktadır. Fakat belirtilen ağır metaller C-S-H, CH, etrenjit, monosülfat gibi hidratasyon ürünleri tarafından bağlanmaktadır. Bu sayede insan ve ekosistem için zararlı olan uçucu kül gibi endüstriyel atıklar bertaraf edilmektedir.

## A STUDY ON THE EFFECTS OF HEAVY METAL AVAILABLE IN CEMENT AND FLY ASH ON HYDRATION AND ENVIRONMENTAL HEALTH

Keywords	Abstract
<i>Heavy Metal, Fly Ash, Environmental Health, Cement, Hydration.</i>	Cement is the most commonly used calcium-based binding agent in concrete production. Moreover, industrial wastes such as fly ash, blast-furnace slag, silica fume, etc. are gradually replacing the use of cement for concrete. Today, the use of industrial waste such as fly ash in the concrete and cement industry reduces the environmental problems. However, cement and fly ash includes heavy metals such as Pb, Cu, Sn, Cr, As, Mo, V, Co and Cd which can be a threat to human health. Heavy metal exposure lead to DNA damage, chromosome disorders, skin lesions, and permanent damage in respiratory system and nervous system. On the other hand, aforementioned heavy metals are chemically bound to hydration products such as C-S-H, CH, ettringite, monosulfate, etc. Therefore, it is possible to eliminate the industrial waste such as fly ash which is harmful to both humans and ecosystem.

### Alıntı / Cite

Kaplan, G., Öztürk, A.U., Uğur Kaplan A.B. (2020). Çimento ve Uçucu Kül Bünyesindeki Ağır Metallerin Etkilerinin Hidratasyon ve Çevre Sağlığı Açısından İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 305-313.

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

G. Kaplan, 0000-0001-6067-7337

A.U. Öztürk, 0000-0003-1747-2576

A.B. Uğur Kaplan, 0000-0003-2222-8789

### Makale Süreci / Article Process

**Başvuru Tarihi / Submission Date** 13.01.2019

**Revizyon Tarihi / Revision Date** 09.11.2019

**Kabul Tarihi / Accepted Date** 14.11.2019

**Yayın Tarihi / Published Date** 20.03.2020

### 1. Giriş (Introduction)

Çimento, kalker ve kil/marn hammaddeleri kullanılarak üretilen ve içerisinde bazı elementleri eser miktarda bulunduran bir malzemedir. Bu elementlerin birçoğunu potansiyel olarak zararlı ağır metaller oluşturmaktadır. Hammaddeler dışında çimento üretiminde kullanılan yakıtların da ağır metal içerdiği belirlenmiştir. Tablo 1'de hammadde ve yakıt içerisinde bulunan eser element ve zararlı ağır metaller verilmiştir (Achterbosch vd., 2003; Mederer vd., 1996).

\* İlgili yazar / Corresponding author: gkaplan@kastamonu.edu.tr, +90-366-280-2956

Tablo 1'de görüldüğü gibi Portland çimentosu içerisinde çeşitli ağır metaller bulunmaktadır. Çimento içerisindeki ağır metallerin davranışları ilk defa 1975 yılında Alman Çimento Endüstrisi Enstitüsü tarafından incelenmiştir (Vollpracht ve Brameshuber, 2016).

**Tablo 1.** Çimento bünyesindeki hammadde ve üretiminde kullanılan yakıt bünyesindeki ağır metaller (Heavy metals in the raw material used in cement and fuel used in its production)

Eser Element- Ağır metal	Hammadde			Yakıt		
	Kireçtaşı mg/kg	Kil mg/kg	Marn mg/kg	Taşkömürü mg/kg	Petrokok mg/kg	Atık Lastik mg/kg
As (Arsenik)	<5	15	5	9	0,5	1,6
Ba (Baryum)	52	321	154	-	-	-
Cr (Krom)	7	105	53	14	4,3	137
Cu (Bakır)	13	29	24	18	2,4	68
Mo (Molibden)	<5	<5	<5	-	-	-
Ni (Nikel)	<7	43	28	23	263	90
Pb (Kurşun)	<10	27	14	27	13	125
Sb (Kalay)	10	7	8	1	0,6	136
V (Vanadyum)	14	128	90	39	758	19
Zn (Çinko)	13	78	48	63	16	6100

Günümüzde kentsel ve endüstriyel atıkların (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) beton üretiminde kullanılması ile çevresel problemler azaltılmaktadır. Ancak kullanılan kentsel ve endüstriyel atıkların içerisinde de insan ve çevre için zararlı ağır metaller mevcuttur. Beton üretiminde kullanılan atık malzemeler zamanla (özellikle yol temellerinde kullanılan geri dönüşümlü agregalar) çeşitli çevresel etkilere maruz kalacaktır. Bu yüzden atık malzemelerin beton üretiminde kullanımı esnasında bu ağır metallerin bertaraf edilmesi planlanmaktadır. Ağır metallerin çözünme davranışı dikkate alınarak betonun maruz kalacağı çevresel şartlar mutlaka dikkate alınmalıdır (JSCE, 2003; Kawai vd., 2014).

## 2. Çimento İçerisindeki Ağır Metallerin Özellikleri (Properties of Heavy Metals in Cement)

### 2.1. Klinker İçerisindeki Ağır Metallerin İncelenmesi (Investigation of Heavy Metals in Clinker)

Klinker içerisinde yer alan ağır metaller hem hidrasyon hem de insan sağlığı açısından etkili olmaktadır. Bu kısımda ağır metallerin hidrasyon ve işçi sağlığı üzerindeki özellikleri incelenecektir.

Ağır metal iyonlarının çimento hidrasyon ürünleri tarafından bağlandığı yapılan araştırmalar sonucu tespit edilmiştir (Takahashi vd., 1973). Metal iyonları ile sulu oksitler (hidroksitler) arasındaki etkileşim üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda bu reaksiyonun pH seviyesi ve çimento bileşenlerine bağlı olarak oldukça kompleks bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir (Kawai vd., 2006).

**Baryum:** Baryum toprak alkali metal sınıfında yer almakla beraber +2 oksidasyon basamağına sahiptir. Boikova'ya (Boikova ve Fomicheva, O.I. Grishchenko, 1997) göre baryum çimento klinkerindeki  $C_2S$  içerisindeki kalsiyum ile yer değiştirme özelliğine sahiptir. Baryumun ( $Ba^{2+}$ ) iyonik çapı kalsiyumun koordinasyon sayısına bağlı olmakla beraber ( $Ca^{2+}$ ) %18-30 daha büyüktür. Bu yüzden baryumun yüksek koordinasyon sayısına sahip kalsiyumlu bileşiklerle yer değiştirmesi sınırlı olmaktadır. Özellikle büyük iyon çapına sahip baryumun ( $Ba^{2+}$ )  $C_3S$  içerisindeki kalsiyum ( $Ca^{2+}$ ) ile yer değiştirmesi engellenmektedir (Holleman 2007). Dumitru ve Utton baryumun hidrasyon süreci üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Her iki araştırmacı da, baryum karbonat ilavesi yapıldığı takdirde baryum sülfat çökmesini belirlemiştir. Kalsiyumlu tuzların aksine baryum sülfat karbonatlara göre oldukça az çözünmektedir (Dumitru vd., 1997; Utton vd., 2011).

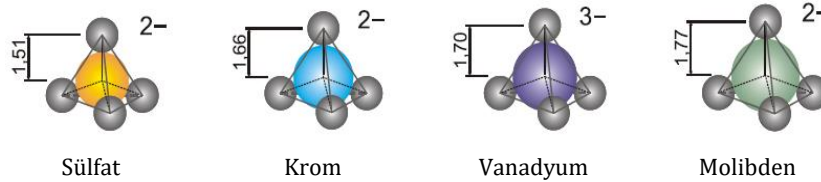
**Kurşun:** Kurşun karbon grubuna ait olmakla beraber +2 ve +4 oksidasyon basamağına sahiptir. Kurşun amfoter element/metal olarak bilinmektedir. Amfoter metaller hem bazlarla hem de asitlerle tepkimeye girebilirler. Düşük ve yüksek (pH>10) seviyelerinde kurşun  $PbO$  ve  $Pb(OH)_2$ 'e dönüşebilir (Pourbaix ve Franklin 1974). Bazı araştırmacılar kalsiyum ( $Ca^{2+}$ ) ve kurşunun ( $Pb^{2+}$ ) yer değiştirdiğini belirtmektedir. Kurşunun ( $Pb^{2+}$ ) iyon çapının kalsiyumdan ( $Ca^{2+}$ ) yaklaşık %13 daha büyük olması iyon alışverişine imkan sağlamaktadır. İyon alışverişinin kalsiyumlu bileşikler C-S-H ve etrenjit fazlarında oluşabileceği belirtilmiştir (Gougar, Scheetz, ve Roy 1996; Holleman, 2007). Saf/sentetik  $C_3S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ , prehidratasyona uğramış  $C_3S$  ve  $C_3A$  içerikli bileşiklere  $Pb(NO_3)_2$  ilavesi yapılmış ve sorpsiyon izotermının ilk aşamasında kurşunun kalsiyumlu bileşikler tarafından bağlandığı belirlenmiştir.  $C_4AF$  bileşiğinin kurşun ile daha çabuk bağ kurduğu belirlenmiştir. 1 g hidrate olmamış  $C_3S$ 'in yaklaşık  $3 \times 10^{-5}$  mol kurşun ile doygunluğa ulaştığı belirlenmiştir. Bu yüzden  $C_3S$  yüzeyinde toplanan kurşun iyonları hidrasyonu durdurmaktadır. Ayrıca  $^{29}Si$  NMR kullanılarak  $C_3S$  ile yapılan çalışmalarda Si-O-Pb bağlarının oluştuğu ve oluşan bağların ise genellikle kovalent bağ olduğu belirlenmiştir (Moulin, 1999).

Çimento pastası gibi güçlü bazik çözeltili ortamlarda kurşun iyonları plumbite ( $PbO_2^{2-}$ ) formuna dönüşecektir.

Plumbitenin elektriksel olarak hidrasyon ürünlerinin yüzeyine tutunma özelliği zor olmaktadır. Çünkü yüksek pH seviyesinde C-S-H negatif elektrik yüküne sahiptir. Ancak yapılan araştırmalar da çimento hidrasyon ürünlerinin Pb iyonlarını bağladığı belirlenmiştir. Bu olay, Pb'nin  $[Pb^{6+}O(OH)_6]^{4+}$  şeklindeki iyon kümesine dönüşmesi açıklanmaktadır. Oluşan katyon grubu sülfat yüzeylerine çökelmekte ya da negatif yüke sahip hidrasyon ürünlerinin yüzeyine tutunmaktadır (Cocke ve Mollah, 1993).

Antimon: Antimon 5A grubuna ait yarımetal sınıfında yer alan elementtir. -3, +3 ve +5 oksidasyon basamağına sahiptir (Holleman ve E. 2007). Bhattı'e göre (Bhattı, 1995) çimento klinkerindeki kalsiyum antimonatlar antimon varlığına neden olmaktadır. Oksidasyon basamağındaki +5 değerli antimon su ile reaksiyona girdiğinde  $Sb(OH)^{6-}$  oksianyon formuna dönüşmektedir. Cornelis,  $Sb(OH)^{6-}$ 'in Portland çimentosu ve hidrasyon ürünleri ile etkileşim içinde olduğunu belirlemiştir. Etrenjit, portlandit, C-S-H, monosülfat üzerinde sorpsiyon deneyleri gerçekleştirmiş ve C-S-H ile monosülfatın  $Sb(OH)^{6-}$  ile etkileşim içinde olduğunu belirlemiştir. Cornelis (Cornelis vd., 2012) yaptığı çalışmada; Portland çimentosunda oluşan Afm fazından farklı olarak antimonat-Afm -  $(Ca_4Al_2[Sb(OH)_6]_2(OH)_{12} \cdot 3H_2O)$ - fazını belirlemiştir. Ayrıca çimento pastasında yüksek oranda (1000 mg/kg) antimon olması durumunda Romeite  $(Ca_{1.13}Sb_2O_6(OH)_{0.26} \cdot 0.74H_2O)$  minerali oluşmaktadır.

Krom ve molibden periyodik tabloda aynı grupta (6A) yer alırken, vanadyum 5A grubunda yer almaktadır. Bu ağır metallerin farklı oksidasyon basamakları bulunmaktadır. Krom ve molibdenin +6, vanadyumun +5 oksidasyon basamağı bulunmaktadır. Krom, molibden ve vanadyum tetrahedral yapıli oksianyon yapısına sahiptir. Tetrahedral iyonlar sülfatlı bileşikler ile yer değiştirme özelliğine sahiptir. Şekil 1'de farklı oksianyonlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi ağır metal iyonlarının sülfatlara göre daha büyük olduğu (bağ mesafeleri) görülmektedir. Ayrıca vanadyumun üç değerli iyon olmasından dolayı dengelenmesi gerekmektedir (Vollpracht ve Brameshuber, 2016).



Şekil 1. Oksianyonların bağları arasındaki mesafeler (Å) (Distances between the bonds of oxyanions - Å)

Çimento klinkeri ve hidrasyon sürecinde kromun bağlanması üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Stephan'a (Stephan, 1999) göre kromun ilk reaksiyonu klinkerin pişirilmesi esnasında silikat fazları ile etkileşimi sonucu başlamaktadır. Çimento bünyesinde  $K_2CrO_4$  ve  $K_2Cr_2O_7$  gibi krom esaslı yapılarda elde edilmiştir. Ayrıca yapılan birçok araştırmada etrenjit bünyesindeki sülfat ile kromun yer değiştirdiği belirlenmiştir (Gougar, Scheetz, ve Roy 1996; Locher 2000). Ochs (Ochs, Lothenbach ve Giffaut, 2002) yüksek alüminalı çimentolarda gerçekleştirdiği sorpsiyon deneylerinde etrenjit ve kromat etrenjit gibi katı çözeltilerin yapısını belirlemiştir.  $C_3S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ , prehidrate  $C_3S$  ve prehidrate  $C_3A$  ile  $Cr(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  kullanılarak sorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda Cr(III) yapısının tüm kalsiyumlu ürünler tarafından daha kolay adsorbe edildiğini göstermektedir. Tüm pastalarda Cr(III)'ün oktahedral koordinasyonuna sahip olduğu belirlenmiştir. Moulin (Moulin, 1999)  $C_3S$ 'li örneklerde krom içeriğine bağlı olarak hidrogarnet:  $Ca_3[Cr(OH)_6-(SiO_4)_{x/4}]_2$  yapısını belirlemiştir. Omosoto vd. (Omosoto, Ivey ve Mikula 1995) C-S-H içerisindeki  $Si^{4+}$  Cr(III) ile yer değiştirdiğini söylemiştir. Omosoto ve Moulin (Moulin 1999; Omosoto, Ivey ve Mikula 1995) yaptıkları çalışmalarda  $Cr(OH)_3$  yapısına rastlamamışlardır. Gougar'a (Gougar, Scheetz ve Roy 1996) göre, Cr(III) ve Cr(VI) etrenjit tarafından bağlanabilir.

+6 oksidasyon basamağına sahip molibdenin kroma göre daha kararlı bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Ancak asidik pH seviyesinde oksidasyon basamağı +3 olmaktadır. Çimento yapısı gereği bazik bir ortama sahip olduğu için molibdenin reaksiyon mekanizması kroma göre fazla kompleks bir yapı göstermemektedir. Kindness (Kindness vd., 1994)  $C_3S$ ,  $C_3A$ , etrenjit ve ticari çimento ile Powellite ( $CaMoO_4$ ) kullanarak sorpsiyon deneyleri gerçekleştirmişdir. Deneysel çalışma sonucunda Afm fazının içerisindeki Powellite ve molibdat içeriğini kontrol etmiştir. Katı faz içerisinde her iki bileşenin de bulunmadığını belirlemiştir. Ayrıca etrenjit içerisinde de molibden belirlenmemiştir.

Vanadyumun çimento klinkeri ve hidrasyon ürünleri tarafından bağlanmasına yönelik çalışma sayısının az olmasından dolayı reaksiyon mekanizması tam olarak belirlenememiştir. Gougar'a (Gougar, Scheetz ve Roy 1996) göre vanadyum etrenjittaki sülfat ile yer değiştirme özelliği gösterebilir ancak bu bilgi deneysel sonuçlara dayanmamaktadır. Pourbaix'e (Pourbaix ve Franklin, 1974) göre ise vanadyum alkali pH ortamında çeşitli oksianyon yapılarında bulunmaktadır. Bu yüzden de bu yapının etrenjit içerisinde yer alması mümkün olmamaktadır. Müllauer'e göre vanadyum Aft fazındaki kalsiyum ile reaksiyona girerek kalsiyum vanadat

oluşturmaktadır (Müllauer, Beddoe, ve Heinz 2015).

Diğer Ağır Metaller: Zhang'a göre klinker bünyesinden gelen arsenik, kadmiyum ve çinko gibi ağır metallerin sertleşmiş çimento pastasından çözülmesi/sızması diğer ağır metallere göre daha zordur (Zhang vd., 2009).

Yang, klinker içerisindeki nikel ve kadmiyum üzerine yaptığı çalışmalarda, Periklas (MgO) bünyesinde yer alan nikelin çözülme/sızma eğiliminin olduğunu belirlemiştir (Yang, Xue ve Huang 2014). Ayrıca kadmiyumun nikelere göre daha zor çözündüğünü, bunun nedeninin ise kalsiyum iyonları ile daha kolay bağ kurması olarak açıklamıştır. Nikel ve kadmiyumun klinkerin pişirilmesi esnasında oluşan ferrit fazı içerisinde bulunduğu da belirlenmiştir. Nikel ve kadmiyum, ferrit fazı içerisindeki kalsiyum ve demir ile yer değiştirmektedir. Ayrıca kadmiyum alit fazı içerisindeki kalsiyum ile yer değiştirme özelliğine de sahiptir. Wang, bu olayın hidrasyon sürecini gözlemleyerek ağır metallerin alit ve belit fazlarının reaktivitesini azalttığı ve bunun sonucunda da C-S-H jelinin ortalama zincir boyunun azaldığını belirlemiştir. Bu etki çimento ve beton dayanımlarını olumsuz etkilemektedir (Wang vd., 2016).

Bakır metali ise daha çok alit ve ferrit fazlarında bulunmaktadır. Bakır belit içerisindeki alitin ayrışmasını hızlandırmakta ve kalsiyum hidroksit reaktivitesini azaltmaktadır. Bakır, hidrasyon aşamasında küçük minor fazlar oluşturarak C<sub>3</sub>A sülfür ile reaksiyon hızını azaltmaktadır (Achternbosch vd., 2003).

Çinko tuzları, çimentonun hidrasyon sürecini yavaşlatmaktadır. Ancak çinko tuzlarının priz geciktirme etkisi günümüzde henüz tam olarak açıklanamamıştır. Gineys'e göre çinko tuzları; kalsiyum alüminat fazları, ferrit fazları ve silikatlar içerisinde bulunmaktadır (Gineys vd., 2011; Stumm vd., 2005). Achternbosch vd. (Achternbosch vd., 2003) göre çinko; C-S-H, AFm yada AFt fazlarında bulunmakla beraber, AFt fazında kalsiyum ile yer değiştirmektedir. Çinko tuzları C-S-H üzerinde çinko oksit, kalsiyum zinkat ya da hemimorfite gibi hidroksit yada karbonat formunda çökelmektedir (Achternbosch vd., 2003).

Kalay, alit fazı üzerinde etkili olarak reaksiyon hızını yavaşlatmaktadır. Ayrıca kalay hidrasyon sırasında kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek kalsiyum stanat (CaO<sub>3</sub>Sn) oluşturur (Ludwig ve Zhang, 2015).

Arsenik tuzlarının ise silikat parçacıklarının yüzeyine tutunduğu belirlenmiştir (Achternbosch vd., 2003; Rodella vd., 2014). Müllauer'e göre baryum ve stroncium boşluk çözeltisinde sülfatlarla etkileşim halindedir (Müllauer, Beddoe ve Heinz 2015). Çimento esaslı malzemelerde talyum ve selenyumun etkileri üzerine herhangi bir bilgi bulunmamaktadır (Horsley, Emmert ve Sakulich 2016).

Çimento bünyesindeki ağır metaller için sonuç olarak; çinko ve kurşun klinkerin pişirilmesi esnasında yüksek oranda klinker içerisinde kalmaktadır. Fırında beslenen çinkonun %80-99'u, kurşunun %72-96'sı klinker içerisinde kalmaktadır. Bu durum vanadyum, berilyum ve nikel içinde geçerlidir. Bunlar klinkerin ana maddesi olan kalsiyum gibi davranış gösterirler. Arsenik ve kromda çok yüksek oranda klinker içerisinde kalmaktadır. Bunun sebebi; fırının bazik ve yükseltgen ortamı içerisinde bu elementlerin uçuculuğu az olan kromat ve arsenata dönüşmesidir. Uçuculuğu az olan kadmiyumun ise %74-88'i klinker içerisinde kalmaktadır. Uçuculuğu yüksek olan talyumun ise klinker içerisinde bulunmadığı bilinmektedir. Bu durum cıva için de geçerli bir bulgu olarak tespit edilmiştir (Mederer vd., n.d.).

## 2.2. Uçucu Kül İçerisindeki Ağır Metallerin İncelenmesi (Investigation of Heavy Metals in Fly Ash)

Uçucu kül çok ince taneli ve puzolanik özellikler için yeterli özgül yüzey alanına sahip Pb, Cu, Zn, Cr, As ve Cd gibi ağır metaller içeren mineral katkıdır (JIANG vd., 2007). Uçucu kül bünyesindeki Pb ve Cd kolayca ayrışarak toprak ve yeraltı suyuna sızabilmektedir. Bu durum insan sağlığı ve çevre için oldukça büyük bir risk oluşturmaktadır (Hua vd., 2006; Qian vd., 2006; Shi ve Kan, 2009). Bu yüzden bünyesinde ağır metal bulunduran uçucu kül gibi atık malzemelerin tekrar kullanımı atık yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Uçucu kül bünyesindeki ağır metallerin yüksek asitlik derecesinde (düşük pH) çözünme oranı ve miktarı artmaktadır (Page, Elsewi ve Straughan 1979).

Uçucu kül bünyesindeki ağır metallerin çözünme süreci üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Uçucu kül bünyesindeki arseniğin %57, kromun %17, kobaltın %8, bakırın %7, nikelin %8, kurşunun %13 ve çinkonun %12 oranında çözündüğü belirlenmiştir. Saha koşullarında yapılan incelemelerde ise kadmiyum, krom ve kurşunun daha çok çözülme özelliğine sahip olduğu görülmüştür (Querol vd., 1996; Saqib ve Bäckström, 2016). Llorens (Llorens, Fernández-Turiel ve Querol 2001) tarafından saf su kullanılarak yapılan çalışmada, uçucu kül bünyesindeki arsenik, krom, kobalt, bakır, nikel, kurşun ve çinkonun çözündüğü belirlenmiştir. Kress (Kress, 1993) deniz suyuna maruz uçucu kül bünyesindeki krom, kurşun ve çinkonun da çözündüğünü tespit etmiştir. Praharaj'a göre (Praharaj vd., 2002), yağmur suyu uçucu kül bünyesindeki arseniğin çözünmesini sağlamaktadır.



Uçucu kül yapısındaki her bir elementin dağılımı birbirinden farklıdır, bununla beraber tane boyutu ne kadar küçük olursa, yüzey/ağırlık oranındaki artışa bağlı olarak daha yüksek ağır metal içeriği bulunur (Özyurt, 2006).

Baba ve ark. (Baba, Gürdal ve Şengünalp 2007), F sınıfı uçucu kül örnekleri üzerinde farklı pH ve sıcaklıkta Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Se, Zn, As ve Cr (VI) elementlerinin sudaki değişimlerini incelemişlerdir. Bu çalışmada elde ettikleri verilere göre, düşük pH ve yüksek sıcaklıklarda ağır metal konsantrasyonları artmıştır. pH 7'de Cd ve Pb dışındaki ağır metallerin, pH 3'te ise Ni ve Se dışındaki ağır metallerin konsantrasyonlarının yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca uçucu kül bünyesindeki ağır metallerin hidratasyon sürecindeki etkisini inceleyen çalışma yer almamaktadır.

### 2.3. Ağır Metallerin İşçi Sağlığı Üzerindeki Etkisi (Effect of Heavy Metals on Worker Health)

Yarılanma ömürleri uzun, yoğunluğu 4.5-5 g/mL'den daha yüksek olan metaller ve metaloidler ağır metaller olarak isimlendirilirler (Järup, 2003). Fe, Cu, Zn, Ni, Mn, Mb ve Se gibi ağır metallerin bir kısmı insan vücudunda yer alıp çeşitli fonksiyonlar üstlenirler ve esansiyel metaller olarak nitelendirilirler. Dolayısıyla, yaşamsal fonksiyonların sağlıklı bir şekilde yürümesi için esansiyel metallerin düzenli olarak gıdalar ile vücuda alınması gerekmektedir. Ancak esansiyel metallerin vücutta belli bir konsantrasyonu aşması, toksik etkiye sebep olur. Bazı ağır metaller ise insan vücudunda bulunmazlar, çok küçük konsantrasyonda dahi toksik etki gösterirler. Vücutta birikme özelliklerinden dolayı insan sağlığı açısından ciddi bir tehdit oluştururlar. Bu gruptaki ağır metaller ise esansiyel olmayan (non-esansiyel) ağır metaller olarak adlandırılırlar. Bu gruba örnek olarak Hg, Cd ve Pb verilebilir. Ağır metaller insan vücuduna ağız, solunum ve deri yolu ile alınabilir. Vücuda alınmış yolu ve dozu, insan vücudunda oluşan toksisite üzerinde etkilidir. Metalin molekül yapısı, çözünürlüğü, yükseltgeme-indirgeme ve kompleks oluşturma yeteneği de toksik etkiyi belirleyen faktörlerdir (Jaishankar vd., 2014; Özbolat ve Tuli, 2016). Yapılan çalışmalar, ağır metallerin vücutta birikmesinden dolayı toksik etkilerinin daha çok kronik maruziyet sonucu gözlemlenebildiğini ortaya koymaktadır. Yapılan bir çalışmada, 19-32 yıl boyunca aynı fabrikada çalışmış olan işçilerde, ortalama 8 yıl maruziyetten sonra nazal bölgede tümör oluşumu gözlemlenmiştir (Satoh vd., 1994).

Ağır metaller hücre içi metabolik süreçleri ve kimyasal reaksiyonları etkileyerek toksik etkiye neden olur. Oksidatif strese bağlı olarak DNA hasarı, mitokondri ve protein hasarı meydana gelir. Ağır metallerin kanserojenik, mutajenik ve teratojenik etkileri mevcuttur. Yapılan çalışmalarda ağır metal maruziyetinin sinir sisteminde otoimmünojenik ve nörolojik bozukluklara neden olduğu gösterilmiştir. Ayrıca karaciğer ve böbreklerde birikmesi sonucu, bu organ fonksiyonlarında da hasara ya da fonksiyon kaybına yol açtığı bildirilmiştir (Çağlıarmak ve Hepçimen, 2010; Järup, 2003; Özbolat ve Tuli, 2016).

Çimento üretimi, hem fosil yakıtların kullanılması hem de hammaddelerin işlenme süreci nedeniyle, en büyük partikül ve metal kontaminasyon kaynaklarından biridir. Yapılan çalışmalar ile çimento fabrikalarının çevresinde daha yoğun ağır metal konsantrasyonu tespit edilmiş ve çimento fabrikalarının çevre için ağır metal emisyon kaynağı olduğu bildirilmiştir (Ogunbileje vd., 2013). Küresel Hg emisyonlarının yaklaşık %9'unu çimento üretiminin oluşturduğu tahmin edilmektedir (Dong, Bank, ve Spengler, 2015). Sadece Amerika Birleşik Devletleri'nde yılda 15 ton civa emisyonu olmakta ve çimento fabrikalarının bu emisyonun üretimine neden olan en büyük üçüncü kaynak olduğu belirtilmektedir (Ogunbileje vd., 2013).

Çimento fabrikalarından doğaya ağır metallerin düşük konsantrasyonda da olsa yayıldığı bilinmektedir (Kabata-Pendias ve Mukherjee, 2007). Ancak bu ağır metallerin düşük seviyelerde olmasına rağmen insan sağlığı açısından zararlı etkileri zamanla ortaya çıkmaktadır. Örneğin düşük seviyede Pb; enzim sistemi öncelikle hemoglobin üretimine zarar vermekte ve hastada hafif anemi, halsizlik, gastrointestinal bozukluklar ve eklemde ağrılar gelişmektedir. Vücutta birikmesi sonucu Pb seviyesi artmakta ve beyinsel fonksiyonlar olumsuz etkilenmektedir (Tatar, 2014).

Krom çimentonun içinde +3 (Cr III) veya +6 (Cr VI) yüklü halde bulunabilmektedir. Cr III kararlı bir formdur, çözünürlüğünün düşük ve reaktivitesinin az olması nedeniyle canlı sistemler üzerindeki olumsuz etkileri azdır. Hekzavalen krom ise (Cr VI) kararsız bir yapıya sahiptir ve güçlü bir oksitleyicidir. Suda çözünür ve korunmaması halinde deriden geçerek Cr III'e dönüşür. Cr III, derideki bazı proteinlerle birleşerek alerjene dönüşür. Bazı insanların bu alerjene duyarlılığı fazladır ve alerjik kontakt dermatit gelişebilmektedir (Bodaghpour, Joo ve Ahmadi, 2012). Cr IV, Grup I karsinojen sınıfındadır, inhalasyon ile vücuda alınması kanser riskini artırmaktadır. İnhalasyon sonucu ayrıca astım, nazal ülser ve nazal perforasyon da oluşabilmektedir (Guertin, 2005).

Hillier ve ark. yaptıkları bir çalışmada çimento toksisitesini değerlendirmek için asetik asit ile gerçekleştirdikleri yöntemle çimento örneklerinde As, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Sb, Se ve Th saptadıklarını bildirmişlerdir (Hillier vd., 1999). Çimento fabrikalarında çalışan işçiler, bu ağır metallerle maruz kalmaktadır. Ağır metal maruziyeti sonucu

serbest oksijen radikalleri oluşmakta, DNA hasarı ve karsinogenez meydana gelmektedir. Smailyte ve ark., çimento fabrikasında çalışan işçiler üzerinde yaptıkları çalışmada, çimento tozuna maruz kalma sonucu akciğer ve mesane kanseri riskinin arttığını bildirmişlerdir (Smailyte, Kurtinaitis ve Andersen 2004). Dietz ve ark. da çimento tozuna maruziyet sonucu gırtlak kanseri gelişebileceğini raporlamışlardır (Dietz vd., 2004). Yapılan bir başka çalışmada, çimento fabrikası etrafındaki toprakta ve üretilen çimentoda mevcut olan ağır metal derişimleri saptanmıştır. Çalışmada aynı zamanda numunelerdeki yüksek ağır metal konsantrasyonları ile o bölgedeki hastalıklar (solunum, kalp, deri, karaciğer, böbrek hastalıkları ve kanser) ve insidansları arasında bir korelasyon kurulmuştur. Yıllara bağlı olarak çevredeki ağır metal konsantrasyonunun artması ile görülen hastalıkların insidansında da artış olduğu görülmüştür (Abimbola, Kehinde-Phillips ve Olatunji 2007). Yapılan çeşitli araştırmalarda çimento tozuna maruz kalan insanların solunum yollarında ve akciğer fonksiyonlarında kronik rahatsızlıklar olduğu ortaya konmuştur. Çimento tozları solunum yollarında birikmekte ve mukoz tabakada tahrişe yol açmaktadır (Isikli vd., 2003; Zeleke, Moen ve Bråtveit 2010).

Çimento üretiminde kullanılan hammaddeler, katkı maddeleri (uçucu kül vb) ve yakıtta cıva bulunabileceği, üretim sırasında sıcaklığın da etkisiyle klor, oksijen ve sülfürle tepkimeye girerek cıva tuzları oluşabileceği bildirilmiştir (Hoenig, 2013). Bu tuzlar, çözünürlükleri yüksek korozif bileşiklerdir. Çözünürlüklerinin artması, neden oldukları toksik etkiyi de artırmıştır. Özellikle gastrointestinal kanalda erozyona sebep olurlar. Epitel hücreleri, kan hücreleri ve plazma proteinleri ile birleşerek organlarda birikirler (Özbolat ve Tuli, 2016). Yapılan bazı çalışmalarda ise, üretilen klinker içinde cıva bulunmadığı raporlanmıştır (Hoenig, 2013). Bu cıvanın buharlaştığını göstermektedir. Uçucu kül içerik olarak değerlendirildiğinde, çimento bünyesinde yer alan diğer ağır metallere göre Hg tehlikesi daha yüksektir. EPA'ya göre temiz ve sağlıklı hava koşulları için uçucu kül bünyesindeki Hg önemli bir yer tutmaktadır. Bu yüzden uçucu kül stoklanan sahalarda (termik santrallerde) sürekli Hg seviyesinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Uçucu kül gibi kömürün yanması sonucu oluşan küllerin bulunduğu sahalarda oluşan Hg atıklarının bertarafı için yasal yönetmelikler hazırlanmalıdır. Uçucu kül bünyesinde solunum sistemine zarar veren Se ve As gibi elementler de bulunmaktadır (US, 2006).

Cıva buharı biyolojik membranları kolaylıkla aşabilmektedir. Çoğunlukla solunum yoluyla vücuda alınır ve akciğerlerden hızla absorbe edilir. Merkezi sinir sistemine yayılması sonucu, huzursuzluk, halsizlik, kişilik bozuklukları, görme bozuklukları, ekstremitelerde istemsiz titremeler görülmektedir. Maruziyetin devam etmesi sonucu, böbrek yetmezliği, solunum sisteminde ve karaciğerde işlev kaybı, geri dönüşsüz beyin hasarı ortaya çıkabilmektedir. Cıvanın tüm formları deri ve mukozadan emilmekte ve dermal maruz kalma, sistemik toksisiteyle sonuçlanabilmektedir. Cıvanın deri ile teması sonucu deride tahriş, alerjik reaksiyonlar ve dermatit görülebilmektedir (Kilavuz, 2005; Özbolat ve Tuli, 2016). Bütün bu toksik etkiler değerlendirildiğinde çimento üretiminde oluşan cıva tuzlarının ve cıva buharının hem işçi hem de çevre sağlığı açısından ne kadar sakıncalı olduğu anlaşılmaktadır.

Çimento fabrikalarından çevreye yayılan ağır metaller doğayı ve gıda zinciri yoluyla insan sağlığını olumsuz etkilemektedir (Bobak, 2000). Yapılan araştırmalarda çimento fabrikasından 18 km uzaklıktaki toprak üzerinde yapılan analizlerde Pb ve Zn varlığı tespit edilmiştir (Al-Saleh vd., 2011; Bermudez vd., 2010). Ağır metalle kontamine olmuş topraklarda yetişen bitkilerde kromozom yapısında bozulma, kromozom fragmantasyonu gibi DNA hasarları görülmekte, mutasyonlar ve biyokimyasal değişiklikler ortaya çıkmaktadır (Tripathi ve Girjesh, 2010; Yahaya, Okpuzor ve Oladele 2012).

Portland çimentosu NTP [Milli Toksikoloji Programı (ABD)], OSHA [İş Güvenliği ve Sağlık İdaresi (ABD)] veya IARC (Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı) tarafından kanserojen madde olarak belirtilmemiştir. Ancak, bu kuruluşlar tarafından kanserojen olarak belirtilen ağır metalleri eser miktarda da olsa içermektedir. Uçucu kül bünyesinde ise ağır metal oranlarının daha fazla olduğu rapor edilmiştir.

### 3. Sonuçlar (Conclusions)

Krom ve bakır gibi ağır metallerin varlığı daha çok klinker ile ilgili olmaktadır. Bazı klinkerlerin yanma/pişirme sıcaklığının diğer klinkerlere göre daha düşük olması bu durumu etkilemektedir.

Krom, nikel, kurşun, arsenik ve kobalt gibi ağır metaller insanlar üzerinde solunum ve sinir sistemini etkileyerek ciddi hastalıklara yol açmaktadır. Ayrıca bu ağır metaller doğadaki diğer canlıları da (bitkiler ve hayvanlar gibi.) olumsuz etkileyerek biyolojik dengeyi bozmaktadır.

Uçucu kül bünyesinde yüksek oranda bulunan baryum, vanadyum, nikel, kurşun, kobalt, molibden gibi zararlı ağır metaller çimento sektöründe kullanılarak bertaraf edilebilir. Çünkü çimentonun su ile reaksiyonu sonucu gelişen hidrasyon ürünlerinin belirtilen ağır metalleri bağlama özelliği bulunmaktadır.

Günümüzde çimento fabrikalarında iş güvenliği ve işçi sağlığı açısından oldukça önemli tedbirler alınmıştır (civa emisyonları vb.). Ancak bu yoğun tedbirler termik santrallerde henüz yaygınlaşmamıştır. Bu durum termik santrallerde çalışan işçilerin sağlığını olumsuz etkilemektedir.

Yüksek ağır metal içeriğine sahip kömür atığı uçucu küllerin zararları çimento ile birlikte kullanımı ile azalacaktır. Termik santrallerde oluşan atıkların azaltılması ile hem doğaya hem de işçi sağlığına olumlu katkı sağlanacaktır.

Literatür taramasında genellikle Portland çimentosu bünyesindeki ağır metallerin hidrasyon süreci incelenmiştir. Ancak mineral katkılardan gelen ağır metallerin hidrasyon kinetiği üzerindeki etkisini inceleyen çalışma mevcut değildir. Özellikle Türkiye'de ağır metal içerikli katı atıkların çimento sektöründe bertaraf edilmesine yönelik çalışma sayısı oldukça azdır.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

### Kaynaklar (References)

- (JSCE), Japan Society of Civil Engineers. 2003. "Leaching of Minor Elements from Concrete." In , 87-92.
- Abimbola, Akinlolu F., Olusegun O. Kehinde-Phillips, ve Akinade S. Olatunji. 2007. "The Sagamu Cement Factory, SW Nigeria: Is the Dust Generated a Potential Health Hazard?" *Environmental Geochemistry and Health* 29(2): 163-67.
- Achternbosch, M vd., 2003. "Heavy Metals in Cement ve Concrete Resulting from the Co-Incineration of Wastes in Cement Kilns with Regard to the Legitimacy of Waste Utilisation."
- Al-Saleh, Iman vd., 2011. "Heavy Metals (Lead, Cadmium ve Mercury) in Maternal, Cord Blood and Placenta of Healthy Women." *International Journal of Hygiene ve Environmental Health*.
- Baba, A., G. Gürdal, ve F. Şengünalp. 2007. "Sıcaklık ve PH'ın Kömür Yakıtlı Termik Santrallerden Kaynaklanan Atıklardaki Ağır Metallerin Suya Geçiş Üzerindeki Etkisi." In 60. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özeti, Ankara, 70.
- Bermudez, Gonzalo M.A. vd., 2010. "Heavy Metal Pollution in Topsoils near a Cement Plant: The Role of Organic Matter and Distance to the Source to Predict Total ve HCl-Extracted Heavy Metal Concentrations." *Chemosphere*.
- Bhatty, J.I. 1995. Role of Minor Elements in Cement Manufacture and Use.
- Bobak, Martin. 2000. "Outdoor Air Pollution, Low Birth Weight, ve Prematurity." *Environmental Health Perspectives*.
- Bodaghpour, S, N Biglari Joo, ve S Ahmadi. 2012. "A Review on the Existence of Chrome in Cement and Environmental Remedies to Control Its Effects." *International Journal of Geology*.
- Boikova, A.I., ve L.V. Fomicheva, O.I. Grishchenko. 1997. "Barium Containing Clinker Phases."
- Çağlırmak, Necla, ve A. Zeki Hepçimen. 2010. "Ağır Metal Toprak Kirliliğinin Gıda Zinciri ve İnsan Sağlığına Etkisi." *Akademik Gıda* 8(2): 31-35.
- Cocke, D.L., ve M.Y.A. Mollah. 1993. "The Chemistry and Leaching Mechanisms of Hazardous Substances in Cementitious Solidification/Stabilization Systems." In *Chemistry ve Microstructure of Solidified Waste Forms, USA*, 187-242.
- Cornelis, G., B. Etschmann, T. Van Gerven, ve C. Vandecasteele. 2012. "Mechanisms and Modelling of Antimonate Leaching in Hydrated Cement Paste Suspensions." *Cement and Concrete Research*.
- Dietz, Andreas vd., 2004. "Exposure to Cement Dust, Related Occupational Groups and Laryngeal Cancer Risk: Results of a Population Based Case-Control Study." *International Journal of Cancer* 108(6): 907-11.
- Dong, Zhao, Michael S. Bank, ve John D. Spengler. 2015. "Assessing Metal Exposures in a Community near a Cement Plant in the Northeast U.S." *International Journal of Environmental Research and Public Health*.
- Dumitru, G., T. Vazquez, F. Puertas, ve T. Blanco-Varela. 1997. "Influence of BaCO<sub>3</sub> on the Hydration of C<sub>3</sub>A." In *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Additives Admixtures Characterisation Technique, Göteborg*, 3015-20.
- Gineys, N., G. Aouad, F. Sorrentino, ve D. Damidot. 2011. "Incorporation of Trace Elements in Portland Cement Clinker: Thresholds Limits for Cu, Ni, Sn or Zn." *Cement and Concrete Research*.
- Gougar, M. L.D., B. E. Scheetz, ve D. M. Roy. 1996. "Ettringite and C-S-H Portland Cement Phases for Waste Ion Immobilization: A Review." *Waste Management*.
- Guertin, Jacques. 2005. "Toxicity ve Health Effects of Chromium (All Oxidation States)." *Chromium (VI) Handbook*: 215-34.
- Hillier, S. R., C. M. Sangha, B. A. Plunkett, ve P. J. Walden. 1999. "Long-Term Leaching of Toxic Trace Metals from Portland Cement Concrete." *Cement and Concrete Research*.
- Hoening, V. 2013. "Sources of Mercury, Behavior in Cement Process and Abatement Options." *European Cement Research Academy*.
- Holleman, A.F, ve Wiberg E. 2007. *Lehrbuch Der Anorganischen Chemie*. 102nd ed. Walter de Gruyter.
- Horsley, Coleman, Marion H. Emmert, ve Aaron Sakulich. 2016. "Influence of Alternative Fuels on Trace Element Content of Ordinary Portland Cement." *Fuel*.
- Hua, Zhang vd., 2006. "Leaching Behavior of Pb ve Zn in Air Pollution Control Residues and Their Modeling Prediction." *Journal of Environmental Sciences-China*.
- Isikli, B. vd., 2003. "Effects of Chromium Exposure from a Cement Factory." *Environmental Research*.
- Jaishankar, Monisha vd., 2014. "Toxicity, Mechanism and Health Effects of Some Heavy Metals." *Interdisciplinary Toxicology* 7(2): 60-72.
- Järup, Lars. 2003. "Hazards of Heavy Metal Contamination." *British Medical Bulletin*.

- JIANG, Jian guo vd., 2007. "Investigation of Basic Properties of Fly Ash from Urban Waste Incinerators in China." *Journal of Environmental Sciences*.
- Kabata-Pendias, A. ve A.B. Mukherjee. 2007. *Trace Elements from Soil to Human*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kawai, Kenji, Akihiko Hayashi, Hiromitsu Kikuchi ve Shinya Yokoyama. 2014. "Desorption Properties of Heavy Metals from Cement Hydrates in Various Chloride Solutions." *Construction and Building Materials* 67: 55–60.
- Kawai, K., S. Tano, T. Ishida ve K. Sakanaka. 2006. "A Study on Mechanism of Heavy Metal Leaching from Concrete." *Cem Sci Concr Technol* 60: 314–21.
- Kilavuz, İlişkin. 2005. "Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu Kozmetik Ürünlerde Ağır Metal Safsızlıkları İlişkin Kilavuz." (1): 1–5.
- Kindness, A., E. E. Lachowski, A. K. Minocha ve F. P. Glasser. 1994. "Immobilisation and Fixation of Molybdenum (VI) by Portland Cement." *Waste Management*.
- Kress, N. 1993. "Chemical Aspects of Coal Fly Ash Disposal at Sea: Predicting and Monitoring Environmental Impact." *Wat. Sci. Tech.* 27(7–8): 449–55.
- Llorens, J. F., J. L. Fernández-Turiel, ve X. Querol. 2001. "The Fate of Trace Elements in a Large Coal-Fired Power Plant." *Environmental Geology*.
- Locher, F.W. 2000. *Zement: Grundlagen Der Herstellung Und Verwendung*. Düsseldorf: VBT Verlag Bau+Technik.
- Ludwig, Horst Michael, ve Wensheng Zhang. 2015. "Research Review of Cement Clinker Chemistry." *Cement and Concrete Research* 78: 24–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.018>.
- Mederer, J. vd., "Geologisches Jahrbuch: UAG 'Hintergrundwerte' Der Ad-Hoc-AG Geochemie." In *Geological Annual: Sub-WG "Background Values", Ad-Hoc-WG Geochemistry. Status Report Dec. 1996*, ed. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Stuttgart: Schweizer'sche Verlagsbuchhandlung.
- Moulin, I. 1999. "Speciation Du Plomb, Du Cuivre, Du Zinc, Du Chrome (III) et (VI) Dans Les Hydrates de Ciment." *Universite de Droit*.
- Müllauer, Wolfram, Robin E. Beddoe, ve Detlef Heinz. 2015. "Leaching Behaviour of Major and Trace Elements from Concrete: Effect of Fly Ash ve GGBS." *Cement and Concrete Composites*.
- Ochs, Michael, Barbara Lothenbach ve Eric Giffaut. 2002. "Uptake of Oxo-Anions by Cements through Solid-Solution Formation: Experimental Evidence ve Modelling." In *Radiochimica Acta*.
- Ogunbileje, J. O. vd., 2013. "Lead, Mercury, Cadmium, Chromium, Nickel, Copper, Zinc, Calcium, Iron, Manganese and Chromium (VI) Levels in Nigeria and United States of America Cement Dust." *Chemosphere*.
- Omotoso, O. E., D. G. Ivey ve R. Mikula. 1995. "Characterization of Chromium Doped Tricalcium Silicate Using SEM/EDS, XRD and FTIR." *Journal of Hazardous Materials*.
- Özbolet, Gülüzar ve Abdullah Tuli. 2016. "Ağır Metal Toksikitesinin İnsan Sağlığına Etkileri." *Arşiv Kaynak Tarama Dergisi* 25(23783): 502–21.
- Özyurt, Z. 2006. "Termik Santral Atıklarındaki İz Elementlerin Çevresel Etkileri." *Osmangazi Üniversitesi*.
- Page, A. L., Ahmed A. Elseewi ve I. R. Straughan. 1979. "Physical and Chemical Properties of Fly Ash from Coal-Fired Power Plants with Reference to Environmental Impacts." In *Residue Reviews*.
- Pourbaix, M. ve J.A. Franklin. 1974. *Nace: Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*. 2nd ed. Texas: National Association of Corrosion Engineers.
- Praharaj, T., M. A. Powell, B. R. Hart, ve S. Tripathy. 2002. "Leachability of Elements from Sub-Bituminous Coal Fly Ash from India." *Environment International*.
- Qian, Guangren, Yali Cao, Pengcheong Chui, ve Joohwa Tay. 2006. "Utilization of MSWI Fly Ash for Stabilization/Solidification of Industrial Waste Sludge." *Journal of Hazardous Materials*.
- Querol, Xavier vd., 1996. "Mineral Composition of Atmospheric Particulates around a Large Coal-Fired Power Station." *Atmospheric Environment*.
- Rodella, N. vd., 2014. "Arsenic Stabilization in Coal Fly Ash through the Employment of Waste Materials." *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- Saqib, Naeem ve Mattias Bäckström. 2016. "Chemical Association and Mobility of Trace Elements in 13 Different Fuel Incineration Bottom Ashes." *Fuel*.
- Satoh, N. vd., 1994. "Chromium-Induced Carcinoma in the Nasal Region. A Report of Four Cases." *Rhinology*.
- Shi, Hui Sheng ve Li Li Kan. 2009. "Leaching Behavior of Heavy Metals from Municipal Solid Wastes Incineration (MSWI) Fly Ash Used in Concrete." *Journal of Hazardous Materials*.
- Smailyte, G., J. Kurtinaitis, ve A. Andersen. 2004. "Mortality and Cancer Incidence among Lithuanian Cement Producing Workers." *Occupational and Environmental Medicine* 61(6): 529–34.
- Stephan, D. 1999. "Chrom. Nickel Und Zink in Klinker Und Zement — Einbau, Eigenschaften Und Auslaugung (Chromium. Nickel and Zinc in Clinker and Cement-Binding. Properties and Leaching)." *University of Siegen*.
- Stumm, Andreas vd., 2005. "Incorporation of Zinc into Calcium Silicate Hydrates, Part I: Formation of C-S-H(I) with C/S=2/3 and Its Isochemical Counterpart Gyrolite." *Cement and Concrete Research*.
- Takahashi, Hideo, Masato Shinkado, Hideshi Hirakida ve Shizushi Hasegawa. 1973. "16. Fundamental Study on Solidification of Hazardous Industrial Wastes Containing Heavy Metals with Portland Cement." In *The Cement Association of Japan. The 27th General Meeting, Technical Session*, 64–67.
- Tatar, Ç.P. 2014. "Kurşun Maruziyetinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi (Akü, Maden ve Metal İşyerlerinde)." *Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü*.
- Tripathi, Ritambhara ve Kumar Girjesh. 2010. "Genetic Loss through Heavy Metal Induced Chromosomal Stickiness in Grass Pea." *Caryologia*.
- US. 2006. *Environmental Protection Agency (EPA), National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants from the Portland Cement Manufacturing Industry*.
- Utton, C. A., E. Gallucci, J. Hill ve N. B. Milestone. 2011. "Interaction between BaCO<sub>3</sub> and OPC/BFS Composite Cements at 20 °C and 60 °C." *Cement ve Concrete Research*.

- Vollpracht, Anya ve Wolfgang Brameshuber. 2016. "Binding and Leaching of Trace Elements in Portland Cement Pastes." *Cement and Concrete Research* 79: 76–92.
- Wang, Fa Zhou vd., 2016. "Incorporation ve Substitution Mechanism of Cadmium in Cement Clinker." *Journal of Cleaner Production*.
- Yahaya, T., J. Okpuzor ve E.O. Oladele. 2012. "Investigation of Cytotoxicity and Mutagenicity of Cement Dust Using Allium Cepa Test." *Res. J. Mutagenesis* 1: 10–18.
- Yang, Yufei, Jingchuan Xue ve Qifei Huang. 2014. "Studies on the Solidification Mechanisms of Ni and Cd in Cement Clinker during Cement Kiln Co-Processing of Hazardous Wastes." *Construction and Building Materials*.
- Zeleke, Zeyede K., Bente E. Moen ve Magne Bråtveit. 2010. "Cement Dust Exposure and Acute Lung Function: A Cross Shift Study." *BMC Pulmonary Medicine*.
- Zhang, Junli vd., 2009. "Comparison of the Fixation Effects of Heavy Metals by Cement Rotary Kiln Co-Processing and Cement Based Solidification/Stabilization." *Journal of Hazardous Materials*.



## SİVİL HAVACILIKTA ELEKTRİKLİ YER HİZMETLERİ TEÇHİZATI KULLANIMI FAYDALAR, KISITLAR VE ÖNERİLER

Melih YILDIZ<sup>1\*</sup>, Savaş MUTLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Atılım Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Atılım Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Havacılık Yönetimi Bölümü, Ankara, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Sürdürülebilir Havacılık,  
Yer Hizmetleri Teçhizatı,  
Emisyon,  
Elektrikli Yer Hizmetleri  
Teçhizatı.*

### Öz

Havacılık sektörü, her yıl gösterdiği yüksek büyüme oranları yanı sıra, çevre ve sağlık sorunlarına neden olan emisyonları azaltmak ve akaryakıt ile işletme maliyelerini düşürmek için gayret göstermektedir. Bu çabaların ortak paydasında bulunan tahrik sistemlerinde elektrik enerjisi kullanımını giderek ilgi çekmektedir. Bir yandan da yetkili otoritelerin elektrikli araç kullanımı konusundaki yaklaşımı sonucu, havacılık ekosisteminin önemli unsurlarından biri olan yer hizmetlerinde kullanılan teçhizatın da elektrikli alternatifleri gündeme gelmiştir. Bu araştırmada, yer hizmetlerinde kullanılan teçhizatın elektrikli olmasındaki faydalar ile birlikte söz konusu teçhizatın kısıtları ve konu hakkındaki öneriler ortaya konulmuştur. Araştırma nitel olarak gerçekleştirilmiş ve ikincil verilerden faydalanılmıştır. Araştırmada dünyada bu alanda yapılmış uygulama çalışmalarından elde edilen deneyim ve modelleme çalışmaları sonuçları analiz edilmiş, bu alandaki genel eğilim ortaya konulmuştur. Ülkemizde önde gelen firmalardan birisinin mevcut elektrikli yer hizmetleri teçhizatı kullanım oranları değerlendirilmiştir. Ülkemiz elektrikli yer hizmetleri teçhizatı kullanımının incelenen ülkeler ortalamasında olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda elektrikli yer hizmetleri teçhizatının yaygınlaşması için gerekli şartlar belirlenmiş ve öneriler oluşturulmuştur.

## ELECTRIC GROUND SUPPORT EQUIPMENT USE IN CIVIL AVIATION: ADVANTAGES, LIMITATIONS AND RECOMMENDATIONS

### Keywords

*Sustainable Aviation,  
Ground Support Equipment,  
Emission,  
Electric Ground Support  
Equipment.*

### Abstract

In addition to its high growth rates, the aviation sector strives to reduce emissions that cause environmental and health problems and reduce fuel and operating costs. The use of electrical energy in the propulsion systems in the common denominator of these efforts is increasingly interesting. On the other hand, as a result of the approach of the authorities in the use of electric vehicles, electric alternatives of ground handling equipment, which is one of the important elements of the aviation ecosystem, have come into the agenda. In this research, the benefits of electrical equipment used in ground services, along with the limitations and suggestions on the subject have been put forward. The research was conducted qualitatively and secondary data were used. In the study, the results of the experience and modeling studies obtained from the application studies in this field have been analyzed and the general trend in this field has been put forward. Current electric ground handling equipment utilization rates of one of the leading companies in our country have been evaluated. It is seen that the use of electrical ground services equipment in Turkey is at the average of the countries examined. As a result of the study, necessary conditions have been determined and recommendations have been established for the widespread use of electrical ground services equipment.

### Alıntı / Cite

Yildiz, M., Mutlu, S., (2020). Sivil Havacılıkta Elektrikli Yer Hizmetleri Teçhizatı Kullanımı: Faydalar, Kısıtlar ve Öneriler, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 314-325.

\* İlgili yazar / Corresponding author: melih.yildiz@atilim.edu.tr, +90-312-586-8885

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
M. Yıldız, 0000-0002-7546-4462	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	27.11.2018
S. Mutlu, 0000-0003-1271-8573	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	28.02.2019
	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	31.07.2019
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Havacılık günümüzde hızla gelişmektedir. IATA verilerine göre 2017 yılında dünyada 4.1 milyar yolcu taşınmıştır. Bu rakam bir önceki yıla göre ortalama yaklaşık %7 lik artış anlamına gelmektedir (IATA, 2017). Yolcu sayılarındaki bu artış havacılığın ekonomik açıdan getirileri yönünden olumludur. Bu yolcu trafiği havacılık faaliyetlerindeki artış ile karşılanabilmektedir. Ancak, havacılığın aynı zamanda gürültü, hava kirliliği, su kirliliği, toprak kirliliği ve iklim üzerinde etkileri bulunduğu da gözden uzak tutulmamalıdır (Marais & Waitz, 2009). Artan havacılık etkinliği ile birlikte, havacılığın bu olumsuz etkileri de artış göstermektedir.

Günümüzde fosil yakıtların artan fiyatları havacılık üzerinde maliyet baskısı oluşturmaktadır. Çağımızın güncel küresel ısınma sorunu ve fosil yakıtların maliyet artışı birlikte ele alındığında, havayolu ve havaalanı işletmecileri maliyetlerini ve sera gazı yayılımlarını azaltma yönünde tedbirler almaktadırlar (Ştimac, Vince, Jakšić, & El, 2013). Bu durumda hem ekonomik, hem de çevresel açıdan havacılıkta daha az fosil yakıt kullanımının temel bir çözüm olacağı görülmektedir.

Havacılık sektörü denildiğinde göz önüne öncelikle uçak filoları gelse de, uçaklar kadar önemli bir diğer filo da havaalanlarında kullanılan yer hizmetleri teçhizatıdır. Bu teçhizat havayolları tarafından "Diğer Filo" olarak da adlandırılmaktadır (Thomas, 2016).

Havaalanlarında kullanılan yer hizmetleri teçhizatı (YHT) çoğunlukla fosil yakıt kullanmaktadır. Ancak genel olarak dünyada fosil yakıt kullanan araçların daha çevreci alternatifleri ile değiştirilmesi eğilimi sonucu olarak bu araçlar da alternatif tahrik sistemleri ile (örneğin elektrikli, yakıt hücreli gibi) üretilmekte veya mevcut olanlar tadilata tabi tutulmaktadır. Ayrıca havaalanlarında şut altı gibi bazı bölgelerde fosil yakıtlı araç kullanımı mevzuat gereği kısıtlanmaktadır (SHGM, 2016).

Bu araştırmada, havacılıkta yer hizmetlerinde kullanılan elektrikli teçhizatın ekonomik, çevresel ve insan sağlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, bu konuda dünyada yapılan kullanım, modelleme ve hesaplama çalışmaları ile Türkiye'deki durumun ortaya konulması amaçlanmıştır.

## 2. Havacılıkta Yer Hizmetleri Faaliyetleri ve Önemi (Ground Support and Its Importance in Aviation)

Havaalanı yer hizmetleri "Bir uçağın havaalanına inişinden-kalkışına kadar geçen süre içerisinde uluslararası havacılık kuruluşları ve sivil havacılık yönetmeliğine göre belirlenmiş standartlar çerçevesinde uçağa, yolculara, bagaja ve kargoya sağlanan hizmetler" olarak tanımlanmaktadır (Ateş, 2016).

Havaalanlarında bulunan yer hizmetleri teçhizatı, yerde buldukları sürede uçağa güç sağlama, uçak bakımı, yakıt verme, uçakların veya bagaj/kargo arabalarının çekilmesi, bagaj/kargo yüklenmesi, yolcuların transferi, içilebilir suyun yüklenmesi, atık suyun taşınması, yiyecek-içecek yüklenmesi, buz çözülmesi (de-icing) işlemi ve itfaiyedir (Korul, 2016; NREL, 2017; Tabares & Mora-Camino, 2017; "Zero-Emission Airport Ground Support Equipment", 2018)

Bir uçak uçuşu sürece gelir yaratmaktadır. Bu nedenle havayolu işletmecileri uçakların havaalanlarındaki bekleme sürelerini mümkün olduğu kadar azaltmaya çalışmaktadır. Örneğin düşük maliyetli havayollarında bir uçağın geliş ve geri dönüş (turnaround) zamanı 20-25 dakika olarak hedeflenmektedir (Aubin, 2004; Koch, 2010). Bu gereksinim yer hizmetlerinin olabildiğince hızlı ve tam olarak gerçekleştirilmesini gerekli kılmaktadır. Uçakların yerde kalış zamanlarının azaltılması konusunda en önemli faktörlerden biri, yer hizmetlerinin sağlanma hızıdır. Bu nedenle yer hizmetleri genellikle zamana karşı bir yarış şeklinde gerçekleştirilmektedir. Büyük havaalanlarında bu hız gereksinimi yer hizmetlerini oldukça stresli hale getirebilmektedir (Tabares & Mora-Camino, 2017).

Günümüzde tam hizmet sağlayan havayolları genellikle topla-dağıt (hub & spoke) denilen ve uçuşları bir noktaya toplayıp bu noktadan dağıtan sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem geniş bir başlangıç-varış (origin-destination) ağı oluşturmakta, toplama noktaları arasında daha büyük uçakların kullanılması nedeni ile daha düşük bilet fiyatları sağlamaktadır. Ancak sistemin kritik unsurlarından birisi de bagajların aktarma meydanlarında hızla

transfer edilmesi gereksinimidir ve karşılanması da yer hizmetlerinin önemli görevleri arasındadır (Wensveen, 2007).

### 3. Yer Hizmetleri Teçhizatı (Ground Support Equipment)

Yer hizmetleri faaliyetlerinin birçoğu için özel tasarımı, şekli ve sınırlamaları olan teçhizata gereksinim duyulmaktadır (örneğin geri itme- pushback, bantlı taşıyıcı, yolcu merdivenleri vb) ve bunlar sadece havaalanlarında kullanım için üretilmektedir. Bunlar düşük hız, yüksek tork isteyen görevlere ve park eden uçakların etrafında kısıtlı alanda manevra yapmaya uygun şekilde üretilmektedirler. Havaalanında çeşitli yerlere gitseler de genellikle birkaç belirli bölgede hizmet verirler. Bazı yer hizmetleri teçhizatı ise (örneğin ikram araçları, buz çözücüler, atık su/tuvalet kamyonları gibi) mevcut otomotiv şaseslerini kullanmaktadır (ICAO, 2011; Tabares & Mora-Camino, 2017).

Havayolu iş modeli (düşük maliyetli ve tam hizmet sağlayan) ve uçuş menzili (kısa, orta ve uzun), verilecek yer hizmetlerini ve bu hizmetlerde kullanılacak teçhizat içeriğini etkilemektedir (örneğin düşük maliyetli havayolları için yiyecek-içecek gereksinimi diğerleri kadar olmamaktadır).

Uzun menzilli bir uçuşta kullanılan yer hizmetleri teçhizatı şunlardır (Tabares & Mora-Camino, 2017):

- yolcu binış köprüsü,
- köprüye entegre yer güç birimi ,
- köprüye entegre hava iklimlendirme birimi ,
- yolcu merdivenleri,
- kargo yükleyiciler,
- kayışlı yükleyiciler,
- ikram kamyonları,
- temizlik araçları,
- yakıt/su araçları,
- mobil yer güç birimi,
- mobil hava iklimlendirme birimi,
- mobil motor çalıştırma birimi,
- içme suyu kamyonu,
- tuvalet hizmeti kamyonu,
- çekme traktörü,
- bagaj traktörü,
- konteyner/palet taşıma arabaları (doli),
- Bagaj doli,
- koniler,
- takozlar,
- çeki demirleri (towbars)

En geniş tanımı ile tipik yer hizmetleri teçhizatı ICAO tarafından Tablo.1'de verildiği şekilde listelenmiştir. Tabloda; yer hizmetleri teçhizatının kullanım amacı, tahrik sistemi ve gücü, her bir uçak seferinde kullanım süresi veya mesafesi ile tahrik sistemlerine yönelik yorumlar yer almaktadır.

Tablo.1'den görüldüğü üzere çok farklı maksatlar ile kullanılan değişik yer hizmetleri teçhizatı mevcuttur. Bu yer hizmetleri teçhizatı farklı tahrik sistemlerine, güç değerlerine ve yükleme oranlarına sahip olabilmektedir. Bu teçhizatın bir uçak seferi için kullanım süreleri genellikle bir saatin altındadır.

En yaygın kullanılan altı çeşit yer hizmetleri teçhizatının halen elektrikli seçenekleri de mevcuttur. Bunlar; geri itme araçları (pushback), kayışlı yükleyiciler (belt loader), konteyner yükleyicileri, bagaj çekiciler (tugs), tuvalet ve içme suyu traktörleridir (truck) (NREL, 2017).



**Tablo 1. Tipik Yer Hizmetleri Teçhizatı (YHT) (ICAO) (Typical Ground Support Equipments (GSE)(ICAO))**

Yer Hizmetleri Teçhizatı	Kullanım Amacı	Motor Tipi/Teçhizat	Bir Seferde Kullanım Süresi	Yorumlar
Yer Güç Birimi	Uçağa elektrik sağlamak	100-150 kW dizel veya benzinli; %15-50 yük	Programa bağlı	Elektrik sistemi kapı/köprüye bağlanabilir
Havalandırma/Isıtma Birimi	Uçağa havalandırma/ısıtma sağlamak	150 kW dizel veya benzinli; %50 yük	Programa ve hava koşullarına bağlı	Kapı/köprüye bağlanabilir
Havali Başlatma Birimi	Ana makineleri başlatmak için yüksek basınçlı hava akışı sağlamak	150 kW dizel; %90 yük	3-5 dakika	Uçakta Yardımcı Güç Birimi (APU) varsa genellikle kullanılmaz
Dar Gövdeli Uçak İtme Traktörü	Geri itme (pushback) ve bakım için çekmek	95 kW dizel, %25 yük	5-10 dakika	Elektrikli modelleri mevcut
Geniş Gövdeli Uçak İtme Traktörü	Geri itme (pushback) ve bakım için çekmek	400 kW dizel, %25 yük	5-10 dakika	
Yolcu Merdiveni	Uçağa kolaylıkla erişim sağlamak	30-65 kW dizel veya benzinli; %25 yük	2-10 dakika	Motorsuz ve elektrikli modeller mevcut
Kayıklı yükleyici (Belt loader)	Bagajların araba ile uçak arasında aktarılmasını sağlamak	33 kW dizel, benzinli veya gazlı; %25 yük	10-50 dakika	Elektrikli modeller mevcut
Bagaj traktörü (tug)	Yüklenmiş arabaları bagaj değişimine çekmek	30 kW dizel, benzinli veya gazlı; %25 yük	10-50 dakika	Elektrikli modeller mevcut
Kargo ve Konteyner Yükleyici	Transfere yardımcı olmak için ağır kargo ve konteynerleri kaldırmak	60 kW dizel veya benzinli, kaldırma teçhizatlı, %25 yük	10-50 dakika	Farklı tipleri mevcut
Kargo dağıtım (delivery)	Kargoyu doli'lerden yükleyiciye aktarmak	30 kW dizel veya benzinli; %25 yük	10-50 dakika	Farklı tipleri mevcut
Çekici (Bobtail Truck)	Çeşitli çekme ve ağır hizmetler	90 kW dizel kamyon; %25 yük	Değişken	Yüksek derecede değişken
Yiyecek-içecek ve hizmet kamyonu	Yiyecekleri ve ikmalî temizlemek ve yenilemek	85-130 kW dizel, makas kaldırıcı; %10-25 yük	10-20 dakika	Yol için sertifikalandırılmış motorlar kullanılabilir
Tuvalet, içme suyu kamyonu	Uçak tuvalet deposunu boşaltmak, su depolarını doldurmak	120 kW dizel, tank ve pompaları mevcut; %25 yük	5-20 dakika	Yol için sertifikalandırılmış motorlar kullanılabilir
Yakıt verme (hydrant) kamyonu	Yakıt hattından (pit) uçağa yakıt vermek	70-110 kW dizel, pompaları mevcut; %10-50 yük	10-40 dakika	Yol için sertifikalandırılmış motorlar kullanılabilir
Yakıt Tankeri	Tankerden uçağa yakıt pompalamak	200 kW dizel; pompaları üzerinde; %10-50 yük	10-40 dakika	Yol için sertifikalandırılmış motorlar kullanılabilir
Buz Çözme (De-icing) aracı	Kalkıştan önce uçağa buz çözme sıvısı püskürtmek	180 kW dizel; tank, pompa ve püskürtücüleri mevcut; %10-60 yük	5-15 dakika	Yol için sertifikalandırılmış motorlar kullanılabilir
Bakım Asansörü (Lift)	Uçağın dışına erişim sağlamak	70 -120 kW dizel, benzin veya gaz; %25 yük	Değişken, az kullanılır	Yol için sertifikalandırılmış motorlar kullanılabilir
Yolcu Transfer Otobüsleri	Yolcuları uçağa ve terminale taşımak	100 kW dizel, benzin veya gaz; %25 yük	Değişken (Zamandan ziyade mesafe)	Yol için sertifikalandırılmış motorlar kullanılabilir
Forklift	Ağır cisimleri kaldırmak ve taşımak	30-100 kW dizel; %25 yük	Çok değişken	Elektrikli modeller mevcuttur; çoğunlukla kargo işlerinde kullanılır
Çeşitli Araçlar	Çeşitli Hizmetler	50-150 kW dizel, benzin veya gaz; %10-25 yük	Çok değişken (Zamandan ziyade mesafe)	Yol için sertifikalandırılmış motorlar kullanılabilir

### 3.1. YHT Kaynaklı Emisyonlar (GSE Emissions)

Yakıtın yanması sonucunda, yanmanın kimyasal özelliklerinden dolayı, farklı gazların ortama verilmesi (egzoz emisyonları) söz konusudur. Bu gazlardan, çevre tarafından indirgenmesi veya etkisi açısından sülfür oksitleri (SO<sub>x</sub>), azot oksitleri (NO<sub>x</sub>), yarım yanma ürünü karbon monoksit (CO) ve parçacık maddelerin (PM) doğrudan insan ve çevre sağlığına zararlı olduğu bilinmektedir (Winther vd., 2015).

İçten yanmalı bir araç motoru, bir insanın bir günde gereksinim duyduğu yaklaşık 15 (onbeş) metreküp havayı 10 (on) dakikada sağlığa zararlı duruma getirebilmektedir (Marangoz, 2004). Sağlık açısından içten yanmalı motorlar tarafından oluşturulan bu emisyonların kardiyovasküler rahatsızlıklardan kanserlere, astımdan diyabeteğe kadar çok çeşitli zararlı etkileri belirlenmiştir (Stettler, Eastham, & Barrett, 2011).

Çevre açısından ise, motorlu taşıtlardan kaynaklanan emisyonlar, sera etkisi ile küresel ısınmada da etkili olmaktadır. Küresel ısınma ise kutup buzlarının erimesi ile deniz seviyesinin yükselmesine neden olmakta ve iklim değişikliği nedeni ile sağlık, tarım, gıda, su kaynakları v.b. alanlarda problemlere neden olmaktadır (R. Çelik & Toprak, 2016; Soruşbay, 2003).

Atmosfere salınan sera gazları miktarının artması, küresel ısınmayı arttırmakta ve iklim değişikliğine neden olmaktadır. İklim değişiklikleri ise insanlardaki çeşitli sağlık sorunları ile birlikte doğada da sıcak hava dalgaları, seller ve kasırgalar gibi olaylara yol açmaktadır (S. Çelik, Bacanlı, & Görgeç, 2008).

Havaalanlarında kullanılan yer hizmetleri teçhizatı, havacılıktan kaynaklanan emisyonlar arasında önemli yer tutarlar. YHT tahrik sistemlerinin emisyon özelliklerine göre incelenmesi sonucunda bu sistemlerin otomobillerin emisyonlarına benzer kirlilik oranına sahip olduğu görülmüştür (Winther vd., 2015).

Hava ulaştırması, insan faaliyetleri sonucu üretilen karbondioksit (CO<sub>2</sub>) yayılımının %2' sinden ve tüm ulaştırma kaynaklı CO<sub>2</sub> salınımının ise %12'sinden sorumludur (IATA, 2013). Havaalanları faaliyetleri ise tüm havacılık emisyonları içinde yaklaşık %5 CO<sub>2</sub> emisyon payına sahiptir (Ştimac vd., 2013). Diğer yandan havayolu operasyonları ile yıllık yaklaşık 10.000 prematüre ölü doğum arasında doğrudan bir ilişki olduğu iddia edilmektedir (Stettler vd., 2011).

Havalimanı emisyonlarının saatlik bazda ölçümü üzerine yapılan kapsamlı bir çalışmada, Kopenhag havalimanının işletilmesi sırasında yakıt tüketim oranları incelenmiştir. Bu çalışmada YHT yakıt tüketiminin tüm havaalanı yakıt tüketimine oranının %2 ve apron tarafındaki yakıt tüketimine oranının ise %24 olduğu tespit edilmiştir. Buradan da görüleceği üzere havaalanında yer hizmetleri teçhizatı tarafından tüketilen yakıt ve dolayısı ile üretilen emisyon oranı önemli boyutlarda olabilmektedir. Anılan çalışma verilerine göre YHT NO<sub>x</sub> ve PM salınımı APU ve uçak motorlarından birkaç kat yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Örneğin operasyonun sabah saatlerinde YHT tarafından saatte yaklaşık 3.2 kg NO<sub>x</sub> üretilirken APU 1.2 kg ve uçak motorları tarafından 0.5 kg NO<sub>x</sub> salınımı gerçekleşmektedir. PM açısından da APU'lar 50 gr/saat PM üretirken, YHT 200 gr/saat üzerine çıkabilmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, YHT'lerin emisyon açısından APU ve uçak motorlarına kıyasla daha kirlenici etki gösterdiği gözlenmektedir (Winther vd., 2015).

Havaalanı operasyonlarının oluşturduğu çevre ve sağlık etkilerinin sınırlandırılması için yetkili otoriteler yönlendirici ve özendirici çeşitli mekanizmalar geliştirmektedirler. Örneğin yeşil havaalanı sertifikası almak havaalanı işletmecileri için her geçen gün daha önemli hale gelmektedir. Diğer yandan YHT motor tiplerine göre kullanım yerlerini sınırlandırıcı mevzuat çalışmaları yürütülmektedir.

### 3.2. YHT Tahrik Sistemleri (GSE Propulsion Systems)

Yer hizmetleri teçhizatının bazıları insan gücü ile hareket ettirilmekte, bazıları bir araç tarafından çekilmekte ve bir kısmı da kendi gücü ile hareket etmektedir. Kendi gücü ile hareket edenler; LPG, benzinli ve dizel İçten Yanmalı Motorları (İYM) kullananlar, elektrik motoru ve batarya kullananlar (e-YHT) olarak sınıflandırılmaktadır.

#### 3.2.1. İçten Yanmalı Motorlar (Internal Combustion Engines)

YHT ana tahrik sistemi olarak LPG, benzin ve dizel türleri yaygın olarak kullanılmaktadır. YHT tarafından ihtiyaç duyulan yüksek güç ve menzil ihtiyaçlarını sağlamakta İYM'lerin bugüne kadar yeterli performans gösterdikleri görülmüştür. İçten yanmalı motorlarda kullanılan fosil yakıtların enerji içeriği açısından günümüzde rakipsiz olduğu literatürde yer almıştır (Soydan, 2016).

### 3.2.2. Elektrik Motorları (Electric Motors)

Elektrikli tahrik sistemleri özellikle havaalanı operasyonlarının daha çevreci olması amacı ile gündeme gelmiş, çalışan sağlığı açısından da şut altı gibi kapalı alanlarda YHT kullanımı hem zorunlu hem de uygun bir seçenek olarak görülmüştür (SHGM, 2016).

Elektrik motorlu ve İYM tahrikli YHT'ler arasındaki en temel fark, enerjinin saklanması açısından görülmektedir. İYM için yakıt tankı kullanılırken, elektrik motorlu olanlar için batarya kullanımı gerekmektedir.

Yapılan bir pazar araştırmasında, e-YHT satın alma kararını etkileyen en önemli parametreler kullanıcılar tarafından şu şekilde ifade edilmiştir: Batarya performansı ve güvenilirlik (%78), destek (support) %61, fiyat ve bakım %59, toplam satın alma maliyeti %52 ve bulunabilirlik (availability) %43 olarak belirlenmiştir (Smith, 2013). Bu verilerin de işaret ettiği gibi, batarya performansı ve güvenilirliği e-YHT satın alma kararlarında en önemli faktörü oluşturmaktadır.

## 4. Elektrikli Yer Hizmetleri Teçhizatı Konusunda Dünyada Yapılan Çalışmalar (Studies on Electric Ground Support Equipment in the World)

Fosil yakıtlı YHT tahrik sistemlerinin sağlık ve çevre etkisini sınırlamak, sürdürülebilir ve maliyet-etkin uygulamalar geliştirmek amacı ile havayolu ve havaalanı işletmecileri arasında yenilikçi çözüm arayışları gündeme gelmiştir.

Bu bölümde, elektrikli yer hizmetleri teçhizatı kullanımı konusunda dünyada yapılan çalışmalar ve elektrikli yer hizmetleri teçhizatı kullanımı ile ilgili ekonomik ve çevresel boyutların modellenebileceği (hesaplanabileceği) çalışmalara yer verilmiştir.

### 4.1. E-YHT Kullanımı Çalışmaları (eGSE Application Studies)

American Airlines'ın 2001 yılında El Paso Uluslararası Havaalanında tüm fosil yakıtlı yer hizmetleri araçlarını elektrikliye çevirdiği ilk büyük projeden beri havaalanlarında e-YHT kullanımına dönüşüm çalışmaları yapılmaktadır ("American Airlines Switches to Electric GSE Fleet", 2001).

Ground Support Worldwide Readers tarafından gerçekleştirilen bir araştırmaya göre, 2013 yılında YHT'nin sadece %10'u elektrikli (Smith, 2013). Delta Havayolları 2016 yılı başlarında tüm dünyada işlettiği 103.000 den fazla YHT parkının %15'ini (15.000 adet) elektrikliye çevirmiştir (Thomas, 2016).

A.B.D. Ulaşım ve Çevre Merkezi (The Center for Transportation and the Environment-CTE) ile Delta Havayolları, 35 adet dizel yer hizmetleri teçhizatını elektrikliye dönüştürmek üzere iş birliği gerçekleştirmişlerdir. Dönüşüm 24 adet kayışlı yükleyici (belt loader) ve 11 adet konteyner yükleyiciyi kapsamıştır. Dönüştürme işlemi; mevcut dizel motor, yakıt tankı, aktarma organı (transmisyon) ve soğutma sisteminin sökülmesi ve bunların bir elektrik motoru, batarya bloğu ve elektrik kontrol sistemi ile değiştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, dönüştürülen teçhizatı şarj etmek üzere her kapiya elektrik şarj cihazları monte edilmiştir. Yapılmış olan bu çalışma ile, dönüşümü yapılmış tüm YHT'nin toplam ömür devri boyunca 11.500 ton sera gazı ve 1 milyon galonun üzerinde dizel yakıt kullanımını azaltması beklenmektedir (Delta, 2013).

A.B.D. Enerji Bakanlığı Idaho Ulusal Laboratuvarı tarafından e-YHT'lerin yaygınlaşabilmesi için en uygun batarya çözümü Ontario Uluslararası Havaalanında (ONT) yapılan bir çalışma ile incelenmiştir. Çalışmada kurşun-karbon ve lityum-ion tabanlı iki farklı batarya 4 bagaj traktöründe kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda lityum-ion tabanlı bataryaların normal kullanım döngüsündeki güç gereksinimini daha iyi karşıladığı görülmüştür (Idaho National Laboratory, 2013).

IBERIA Havayolları tarafından dizel YHT'lerin e-YHT'ye dönüştürülmesi ile yapılan çalışmalarda, ortam sıcaklığı, araçların yoğun kullanımı ve kirlilik nedenleri sonucunda istenen operasyonel performansa erişilememiştir. Verim düşüklüğünün en önemli nedeninin şarj sıklığının yüksek ve şarj süresinin uzun olması olduğu belirtilmiştir. Bunun üzerine hibrid yakıt hücresi kullanımı ile oluşturulan hibrid enerji depolama sistemlerinin işlevsel gereksinimi sağladığı görülmüştür (Fontela vd., 2007).

A.B.D.'de 2012 yılında yapılan bir araştırmada, toplam 10.025 YHT'nin yaklaşık %11.6'sının e-YHT olduğu tespit edilmiştir. Bu YHT'ler içinde en yüksek sayıya sahip olan bagaj traktörlerinin (2.575 adet) ise %16.7'lik kısmı elektrikli (NAS, 2012).

Havaalanlarında e-YHT kullanımı ile ortaya çıkan şarj üniteleri ihtiyacının, elektrik şebekesi üzerindeki etkileri de incelenmiştir (Rajagopalan vd., 2003). Bu çalışma sonucunda şarj ünitelerinin şebeke üzerindeki güç faktörü açısından bozucu etkileri incelenmiş gerek ölçüm gerek hesaplama yolu ile veriler analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda şarj ünitelerinin elektrik şebekesi üzerinde bozucu etkisi olmadığı görülmüş, havaalanı elektrik şebekesi tasarımında istenen güç değerlerinin baştan dikkate alınması ihtiyacına dikkat çekilmiştir.

#### 4.2. E-YHT Modelleme ve Hesaplama Çalışmaları (eGSE Modelling and Calculation Studies)

Zagreb Havaalanı için Airbus A319/A320 uçağının incelendiği bir çalışma ile YHT araçlarının elektrifikasyonu ile elde edilecek faydaların modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Modelin kullanımı hem düşük maliyetli hem de tam hizmet iş modelleri için sınanmıştır. Çalışma sonucunda Zagreb Havaalanında bir günde 16 adet tam hizmet sunan ve üç adet düşük maliyetli havayoluna ait toplam 19 A319/A320 uçağına fosil yakıtlı yerine E-YHT ile hizmet verilmesi durumunda günlük 38.70 kg ve yıllık 23.427 kg daha az CO<sub>2</sub> emisyonu olacağı hesaplanmıştır (Ştimac vd., 2013).

Elektrik motorları veya benzinli ve dizel motorlar ile tahrik edilen havaalanı yer hizmetleri araçlarının ekonomik olarak geri ödemesini hesaplayan bilgisayar programının geliştirilmesi için çabalar mevcuttur. Modellenmesine çalışılan yer hizmetleri teçhizatı tipleri, geri itme (pushback) traktörleri, bagaj traktörleri ve şeritli yükleyicilerdir. Yer hizmetleri teçhizatı modelleme yazılımı, içten yanmalı motorlu yer hizmetleri teçhizatının elektrikli yer hizmetleri teçhizatı ile değiştirilmesi ile kazanılan egzoz yayılımını tahmin eden bir yazılım modülü içermektedir. Model geliştirilmesinde kullanılan varsayımlar, metodoloji, kullanıcı kılavuzu ve modelleme sonuçları bir rapor ile yayınlanmıştır. Model, dört ABD havaalanındaki iki havayolunun faaliyetleri temelinde geliştirilmiştir. Havaalanları ülkenin farklı bölgelerinde, değişik iklimlerde ve değişik arazi özelliklerinden olacak şekilde seçilmiştir (Morrow, Hochard, & Francfort, 2007).

Geri itme (pushback) traktörleri, bagaj traktörleri ve şeritli yükleyicilerin maliyetleri; sermaye maliyetleri, operasyon ve bakım maliyetleri ve ilgili altyapı maliyetlerini kapsamaktadır. Finansal analiz sonuçlarına göre içten yanmalı motorlu yer hizmeti teçhizatı (İYM GSE) için maliyeti etkileyen en büyük değişkenin akaryakıt maliyeti olduğu bulunmuştur. Bu nedenle akaryakıt kullanım miktarı yüksek olan YHT'lerin elektrikli modellerinin yatırım geri dönüş oranları hızlı olmaktadır. Örneğin Elektrikli bagaj traktörleri ve kayışlı yükleyiciler gibi normalde fazla akaryakıt harcayan YHT'ler, çoğu uygulamada, benzer performanstaki İYM YHT göre daha maliyet-etkindirler ve geri ödeme süreleri makuldür. Geri itme (pushback) traktörleri ise e-YHT için yüksek sermaye maliyeti ve düşük akaryakıt kullanımı nedeni ile daha uzun geri dönüş süresine sahiptirler (Morrow vd., 2007).

Yukarıda anılan çalışmadaki model geliştirmede veri iki ana kategoriye ayrılmıştır: (1) sermaye maliyetinin içerdikleri; GSE nin satın alınma fiyatı, GSE yi hizmete sokmadan önce gerekli değişiklikler, akü şarj aletleri, şarj sisteminin kurulum maliyetleri, (2) GSE bakımı, şarj altyapısı bakımı ve yakıt maliyetlerini içeren harcamalar.

Yayımlım (emisyon) hesaplamasında; uçağın büyüklüğü (dar gövde, geniş gövde), uçağın park ettiği pozisyon (köprü, apron, APU operasyonu, GSE operasyonları dikkate alınmaktadır (Fleuti, 2014). Yayımlım (Emisyon) hesaplamasında ikisi basit, ikisi daha gelişmiş olmak üzere dört yöntemden bahsedilmektedir (ICAO, 2011):

Birinci basit yöntem uçağı temel alan bir yaklaşımdır. Toplam emisyon; uçak gelişleri, kalkışları veya her ikisi ile önceden belirlenen (default) emisyon faktörleri çarpılarak hesaplanır. Örneğin dar gövde bir uçağına verilen bir yer hizmeti esnasında 0.400 kg/cycle NO<sub>x</sub>, 0.040 kg/cycle HC, 0.150 kg/cycle CO, 0.025 kg/cycle PM10 ve 18 kg/cycle CO<sub>2</sub> emisyonu olduğu varsayılmaktadır. Söz konusu değerler Zürih Havaalanında yapılan çalışmalarda elde edilmiştir.

İkinci basit yöntem yer hizmetleri teçhizatı tarafından harcanan yakıt miktarını temel alan bir yaklaşımdır. Bu yöntemde dizel ve benzinli teçhizat tarafından harcanan yakıt miktarı ile ortalama emisyon faktörleri çarpılır. Örneğin Avrupa'da CO emisyonu dizel için 15.0 g/kg ve benzin için 1193.0 g/kg'dır. Benzer şekilde CO<sub>2</sub> emisyonu dizel için 3150 g/kg ve benzin için 3140 g/kg'dır.

Üçüncü gelişmiş yaklaşımda her yer hizmetleri teçhizatının çalışma zamanı veya belirli bir zamandaki yakıt kullanımı bilinmeli veya tahmin edilebilmelidir. Hesaplama toplam yakıt kullanımı veya toplam çalışma saati kullanılabilir.

Emisyon-Y (g/YHT) = Yakıt (kg/saat) x Emisyon Faktörü-Y (g/kg.yakıt) x YKZ x DF veya

Emisyon-Y (g/YHT)=Güç (kW) x Yük (%) x Emisyon Faktörü-Y (g/kg.yakıt) x YKZ x DF

veya

Emisyon-Y(g/YHT) = Yakıt (yıllık kg.) x Emisyon Faktörü-Y (g/kg.yakıt) x DF

YKZ = Yıllık Kullanma Zamanı (saat)

DF = Deterioration Factor

Dördüncü ileri yaklaşımda tüm yer hizmetleri teçhizatının emisyonları, her operasyon (geliş, gidiş ve bakım) için ayrı ayrı hesaplanır.

Emisyon-Y (g) = Güç (kW) x Yük (%) x Emisyon Faktörü-Y (g/kWh) x UOZ (saat) x DF

UOZ = Park pozisyonu, uçak tipi, operasyon tipine göre ortalama YHT çalışma süresi (saat)

DF = Deterioration Factor

Örneğin bir yolcu merdiveni apronda park eden B737 tipi bir uçağa 10 dakika hizmet verdiği durumda, merdivenin 45 kW motoru, %25 yükte çalıştığı durumda, toplam salınımı NO<sub>x</sub>= 11.61g olarak tespit edilir. Burada NO<sub>x</sub> 6.0 g/kW-h ve DF yüzde 3 olarak kabul edilmiş olup, formül şu şekilde verilmiştir;

$45 \text{ kW} \times 0.25 \text{ yük} \times 6.0 \text{ g/kw-h} \times 1.03 \text{ DF} \times 10 \text{ dk./60 dk} = 11.61 \text{g NO}_x$

Yukarıdaki hesaplardan da görüleceği üzere, bir uçağa verilen yer hizmetleri sırasında her bir seferde sadece CO<sub>2</sub> açısından bakıldığında bile 20 kg mertebelerinde emisyon değerleri görülmektedir. Bu emisyon değeri uçağın emisyon değerleri ile birleştiğinde havaalanı civarında oldukça yüksek hava kirliliği oluşumu beklenmesi olağan görülmektedir.

## 5. Elektrikli Yer Hizmetleri Teçhizatı Avantaj ve Dezavantajları (Advantages and Disadvantages of Electric Ground Support Equipment)

Havayolu taşımacılığında kaynaklı emisyonların azaltılması amacı ile yer hizmetleri araçlarında içten yanmalı tahrik sistemlerinden elektrik motorlu olanlara geçmenin faydaları konusunda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu iki tahrik sisteminin bugüne kadar yürütülen çalışmalarda tespit edilen avantaj ve dezavantajları izleyen başlıklarda ele alınmıştır.

### 5.1. E-YHT Avantajları (Advantages of eGSE)

Elektrikli yer hizmetleri teçhizatı kullanımı daha düşük egzost emisyonu seviyesi yanında işletme sırasında ortaya çıkan gürültüyü de azaltmaktadır ("American Airlines Switches to Electric GSE Fleet", 2001).

Elektrikli tahrik sistemi kullanan araçlarda, durma pozisyonunda yakıt sarfiyatı yoktur. İYM motorlar, araç dursa bile rölanti devrinde çalışmak zorundadırlar.

Elektrik motorları, duruş anından itibaren yüksek tork üretebilirler. Araçların duruş pozisyonundan itibaren daha az zamanda hızlanabilmeleri bazı uygulamalar için istenmeyen bir özellik olsa da uygun motor sürücü ayarları yapıldığı takdirde enerji verimliliği ve operasyon hızı açısından faydalı olabilir. YHT ve özellikle de çekici araçların, çektikleri ağırlığa karşı yüksek moment sağlayabilmesi için ağırlığın yüksek olması beklenir. Bu açıdan bakıldığında, YHT batarya ağırlıkları operasyon açısından bir sorun teşkil etmemektedir (Idaho National Laboratory, 2013). Hatta bu durum, lityum -iyon bataryalarda ikincil kullanım açısından bir fırsat olarak da değerlendirilebilir.

Elektrikli araçların hareketli parçasının az olmasından dolayı, İYM araçlara kıyasla bakım maliyetleri düşüktür. Otomobillerle kıyaslandığında, bir otomobilin ömür devri boyunca bakım maliyetinin yaklaşık yarısını yağ ve yağlama giderleri tutmaktadır (Pfırrmann-Powell, 2014). Elektrik motorlu araçlarda bu gider ihmal edilebilir boyutlardadır. İYM YHT bakım maliyetlerinin saatlik operasyon başına yaklaşık 35.35 USD olduğu tespit edilmiştir. İYM YHT'lerin e-YHT'lere kıyasla yaklaşık 2.5 kat daha fazla bakıma girdiği bilinmektedir (NAS, 2012).

Elektrikli yer hizmetleri teçhizatı kullanımı ile havaalanlarında araç başına işletme maliyetlerinin düşük olduğu, bunun yanı sıra e-YHT ilk yatırım maliyetlerinin İYM ekipmanlara kıyasla yüksek olduğu görülmüştür. Yapılan analizler e-YHT yatırım geri dönüş sürelerinin 3 ila 7 yıl arasında olduğu, İYM araçların elektrikliye

dönüştürülmesi ve toplu alımlar gibi tedbirlerle de bu maliyetin düşürülebileceği belirlenmiştir (Morrow vd., 2007).

## 5.2. E-YHT Dezavantajları (Disadvantages of eGSE)

YHT tahrik sistemlerinde elektrik ve batarya kullanımı ile elde edilen enerji tasarrufu, bakım/onarım maliyetinin düşüklüğü, çevre ve insan sağlığına olumsuz etkilerin azaltılması gibi avantajların yanı sıra bazı dezavantajlar da mevcuttur.

Bunların en önemlisi bataryaların soğuk ve sıcak ortam şartlarında kullanımından kaynaklı problemlerdir. Bataryaların işletme sıcaklıklarının altında veya üstünde derecelerde kullanılmaları bataryaların ekonomik ömründe önemli bir düşüşe neden olmaktadır. Benzer şekilde işletme sıcaklıklarının üstünde bazı bataryaların güvenlik sorunları da ortaya çıkabilmektedir (Andrea, 2010; Rahn. D. & Wang, 2013). Örneğin IBERIA, dizel kargo araçlarını elektrikli ile değiştirmiş, ancak ortam sıcaklığı, nem, kirlilik ve batarya şarj sürelerinin uzun olması nedeni ile bu dönüşümden verim alınamamıştır (Fontela vd., 2007).

İşletme yönünden ise, kış şartlarında veya soğuk ortamlarda, İYM tahrikli YHT'lerde kullanıcı personelin konfor ısıtması için, İYM tarafından üretilen atık ısıdan faydalanılması mümkün iken, e-YHT atık ısıya sahip olmadığından, kullanıcı personel konfor ısıtması için da ayrıca bir elektrik kullanımı söz konusudur. Anılan bu konfor ısıtması için elektrik kullanımı, e-YHT'nin enerji verimini ve performansını olumsuz etkileyecek boyutlarda olabilmektedir.

Batarya şarj sistemleri, İYM ekipmanlar için akaryakıt ikmaline benzer bir problem ortaya çıkarmaktadır. Ancak günümüz havaalanı altyapılarının e-YHT için hazır olmamasından dolayı, bataryaların şarjı yeni nesil altyapı ve gereklilikler doğurmaktadır. Bunlardan ilki havaalanlarında mevcut elektrik altyapısı ile bataryaların şarjı üzerinedir. Bu konuda yapılan çalışmalar (Rajagopalan vd., 2003) e-YHT bataryalarının şarjı için elektrik şebekesinde ve daha sonra da şarj ünitelerinde bazı şartların sağlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

e-YHT için batarya değiştirme (battery swapping) şarj sorununa bir cevap olarak geliştirilmiş olmakla birlikte, her bir ekipman için en az iki batarya yatırımı ve bu bataryaların söküp takılması için ayrı bir altyapı yatırımı ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır. Diğer yandan havaalanında operasyonel sahaya yakın olması amacı ile dağıtık olarak yerleştirilecek şarj üniteleri de gerek işletme gerekse de emniyet açılarından ayrı bir çalışma konusu olarak öne çıkmaktadır.

Elektrik motoru, beraberinde elektrik enerjisinin depolanması için batarya gerektirmektedir. Günümüz batarya teknolojileri son on yılda oldukça gelişme gösterse de, halen istenen enerji yoğunluğu ve maliyet seviyesine ulaşamamıştır (Yildiz & Karakoc, 2016). Örneğin elektrik motorlu ve bataryalı bir YHT büyük havalimanlarında iki uzak nokta arasında tek şarjla hareket edemeyebilmektedir.

Silvester ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan çalışma (Silvester vd., 2013) sonuçlarına göre e-YHT dezavantajları şu şekilde sıralanmıştır:

Elektrikli araçların menzilleri içten yanmalı motora sahip araçlara göre kısıtlıdır ve bu durum mevcut batarya teknolojisinden kaynaklanmaktadır. Elektrikli araçların makul fiyatlar ile istenen menzillere ulaşması için önemli teknolojik gelişmelere ihtiyaç vardır. Çok sayıda elektrikli aracın aynı anda şarj edilebilmesi için havaalanlarında operasyonları kesintiye uğratmayacak şekilde ve uygun kapasitede elektrik şebekesine ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryadan dolayı e-YHT ilk yatırım maliyetleri halen yüksektir.

## 6. Türkiye'de Elektrikli Yer Hizmetleri Teçhizatı Kullanım Durumu (Electric Ground Support Equipment Deployment in Turkey)

Türkiye'de sivil havacılık uygulamalarının yasal düzenlemelerini ve denetimini yapmakla sorumlu Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) tarafından 18.3.2016 tarihinde yayınlanan Yeşil Havaalanı Projesi Sektörel Kriterler Dokümanı çerçevesinde, yer hizmetleri firmalarına çevresel etkileri minimize etmek amacı ile bazı düzenlemeler getirmiştir (SHGM, 2017). Bu düzenlemeler arasında,

- Bagajları ayırım ve yükleme/boşaltma işlemlerinin yapıldığı şut altına içten yanmalı motorlara sahip taşıtların girmesi yasaklanmıştır, bu amaçla sadece elektrik motorlu araçlara izin verilmiştir,
- Hava aracının köprüye yanaşması ve köprü üzerinde ilgili altyapının mevcut olması halinde YHT kullanılarak hava aracına hava ve enerji verilmesi yasaklanmıştır.

Aynı dokümanda ayrıca yer hizmetlerinin çevresel etkilerinin gürültü, su kirliliği gibi alanlarda da iyileştirilmesi için düzenlemelere yer verilmiştir. SHGM tarafından başlatılan proje ve yayınlanan doküman çerçevesinde yer hizmetleri firmaları şut altında kullanmak üzere e-YHT tedariki yapmışlardır.

SHGM tarafından yayınlanan 26 Ağustos 2016 tarihli Havalimanları Yer Hizmetleri Yönetmeliği (SHGM, 2016) Madde 14 gereğince YHT cins ve özelliklerini takip etmekle yükümlü kılınmıştır. Ancak, Türkiye'deki devlet havalimanlarının yönetilmesinden sorumlu olan Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğünde havaalanı bazında kullanılan içten yanmalı ve elektrikli yer hizmetleri teçhizatı envanterine ait bilgi bulunmadığı ifade edilmiştir (DHMI, 2018).

Türkiye'de A tipi yer hizmetleri sertifikası olan 3 yer hizmetleri firmasından birinin 2017 tarihli Sera Gazı raporunda (TGS, 2017) yer alan bilgilere göre, faaliyet gösterdiği istasyonlar bazında Ocak 2017 tarihi itibarı ile elektrikli ve İYM YHT sayıları Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Bir Yer Hizmetleri Firmasının 2017 yılı Ocak ayı itibarı ile elektrikli araç envanteri (TGS, 2017), (Electric vehicle park of a ground support company as of 2017 January (TGS, 2017))

İstasyon Adı	İYM YHT sayısı	Elektrikli YHT sayısı	e-YHT sayısının toplam araç sayısına oranı
Antalya	247	26	%9.52
Adana	50	3	%5.66
Ankara	169	20	%10.58
İzmir	119	14	%10.53
Dalaman	55	6	%9.84
Milas-Bodrum	64	9	%12.33
İstanbul Atatürk	1055	147	%12.23
Sabiha Gökçen	232	27	%10.42
<b>TOPLAM</b>	<b>1991</b>	<b>252</b>	<b>%12.66</b>

Tablo 2. verilerinin analizinden, Türkiye'de örnek olarak seçilmiş olan yer hizmetleri firması verileri baz alındığında YHT'lerin yaklaşık %13'lük bölümünün e-YHT olduğu görülmektedir. Elektrikli araçlar genel olarak SHGM tarafından şart koşulan kapalı alanlarda İYM kullanılmasının yasaklanması üzerine kullanıma alındığı değerlendirilmektedir.

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

Bu çalışmada, her geçen gün büyümekte olan havacılık sektörünün alt sistemlerinden olan yer hizmetlerinde fosil yakıtlı teçhizat yerine elektrikli teçhizatın kullanımı konusunda yapılan uygulama, modelleme ve hesaplama çalışmaları incelenmiştir.

Elektrikli veya diğer tahrik sistemlerine sahip yer hizmetleri teçhizatı kullanımı kararında dikkate alınması gereken faktörlerin en az; ilgili yasal mevzuat, ilk satın alma maliyeti, bakım-idame maliyeti, havaalanının bulunduğu bölgedeki iklim koşulları (çok sıcak veya çok soğuk), hizmet verilen uçak tipi (geniş gövde, uzun menzilli veya dar gövde, kısa ve orta menzilli), hizmet verilen havayolu iş modeli (düşük maliyetli havayolu, tam hizmet sunan havayolu) olduğu görülmüştür.

Literatürde, fosil yakıtlı araçların elektrikliye çevrilmesi üzerine çalışmaların bulunmasına ve bu yöntemin maliyet etkinlik açısından önerilmesine rağmen, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) tarafından yayınlanan 26 Ağustos 2016 tarihli Havalimanları Yer Hizmetleri Yönetmeliği (SHY-22) Madde 14 gereğince yer hizmetleri firmalarında kullanılacak YHT'lerin "orijinal imalat olması ve imalatçısından veya yetkili satıcısından alınmış olması zorunludur". Bu durumda Türkiye'de mevcut fosil yakıtlı teçhizatın elektrikliye modifiye edilmesinin mevzuata göre mümkün olmadığı tespit edilmiştir.

Elektrikli teçhizatın kullanımı sonucunda zararlı emisyonların azaltılması ve fosil yakıtlara göre tasarruf edilen maliyetler bilinse de bu çalışmada konuya dezavantajlar ve optimizasyonlar yönünden de bakılmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen değerler ışığında çözüm önerileri izleyen paragraflarda sunulmuştur.

Havaalanı ortam şartlarının çok sıcak ve çok soğuk olması durumunda konvansiyonel olarak tercih edilen kurşun asit batarya teknolojisinin performansının teorik değerlerin çok altında kalmasından dolayı tercih edilemeyeceği, bu koşullarda ısı yönetiminin yapıldığı lityum-iyon batarya tercih edilmesi veya hibrit araçların kullanımının değerlendirilmesinin gerektiği düşünülmektedir.

Hibrit motor veya hibrit tahrik sistemi, İYM ve elektrik motorunun araç tahrikinde birlikte kullanılması durumudur. Hibrit tahrik sistemi, aracın kullanım yerine göre her iki motor tipinin avantajlarını bir araya getirmek için kullanılan bir yöntemdir. YHT üreticileri arasında yapılan katalog araştırmasında hibrit tahrik sistemine sahip bir ürün tespit edilmemiştir.

Fosil yakıt tüketimi fazla olmayan YHT sistemlerinin elektrikliye çevrilmesinin yatırım dönüş süresinin çok uzun olabileceği ve bu nedenle öncelikle kullanımda yakıt sarfiyatı yüksek olan araçların elektrikli olarak dönüştürülmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Batarya hücrelerinin ucuzlaması ile daha çok sayıda hücreden oluşan bataryaların kullanımının, YHT açısından ağırlık sorunu olmadığından gerek ısı yönetim gerekse de enerji kapasitesi açısından önemli bir imkân yaratabileceği düşünülmektedir.

Otomotivde gündeme gelen bataryaların ikincil kullanımı, yani kullanılmış hücrelerin yeniden değerlendirilmesi ile elde edilen bataryaların YHT'lerde de kullanımının değerlendirilebilecek bir konu olduğu görülmektedir. YHT kullanımında batarya şarj sürelerinin zaman açısından kritik olan havaalanı yer operasyonları açısından örece uzun olması, bugüne kadar yapılan örnek uygulamalarda en önemli dezavantajlardan biri olarak ön plana çıkmıştır. Halen operasyon sahalarının İYM tahrikli YHT'ler için tasarlanmış olmasından dolayı, şarj alanları genelde YHT'lere teknik servis verilen alanlarda, yani esas operasyon sahalarından uzakta olmaktadır. Bu da e-YHT'nin zaten uzun şarj sürelerine bir de servis bölgesine intikal süresi eklemektedir. Havaalanı operasyonunun tasarımı esnasında elektrikli YHT şarj noktalarının da göz önüne alınması, verim ve hız açısından kazanım sağlayabilecektir.

Elektrikli YHT'lerden havaalanlarında beklenen daha uzun menzil konusu, YHT'lerin ağırlık sorunu olmadığından daha çok batarya kullanımı ile aşılabilecek gibi görülmektedir. Bu konuda yapılacak ekonomik fizibilite etütlerinde batarya maliyeti kritik unsur olacaktır. Ancak özellikle otomotiv bataryalarının ikincil kullanımı ile YHT batarya maliyetlerinin azaltılması mümkün görülmektedir.

Havaalanlarında elektrikli YHT kullanımının gelişebilmesi için şarj gereksiniminin operasyonun bir parçası olarak ele alınması gerekliliği görülmektedir. Diğer yandan gelişmekte olan temassız şarj teknolojilerinin havaalanı güvenliği de göz önüne alınarak belli bölgelerde kurulması da şarj sorununu ortadan kaldıracak ve operasyon sahasında önemli zaman tasarrufu sağlayabilecek bir yetkinlik olarak değerlendirilmektedir.

Yer hizmetlerinin doğasından kaynaklanan hız gereksinimi nedeni ile zaman zaman operasyonda emisyon azaltılması ve enerji verimliliği ikinci hatta üçüncü önceliğe inebilmektedir. Operasyonun artan yolcu trafiği ve hız gereksinimine göre yeniden planlanması ihtiyacı olduğu görülmektedir. Bu tasarım aşamasında e-YHT kullanımının ve e-YHT kullanımından doğan gereksinimlerin de göz önüne alındığı hizmet tasarımı yapılmasının gerekli olduğu öngörülmektedir.

### **Teşekkür (Acknowledgement)**

Bu çalışma kapsamında Turkish Ground Services (TGS) firması Esenboğa İşletme Müdürlüğü tarafından sağlanan verilerden yararlanılmıştır.

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

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

### **Kaynaklar (References)**

- American Airlines Switches to Electric GSE Fleet (2001), [www.automotive-fleet.com/49245/american-airlines-switches-to-electric-gse-fleet](http://www.automotive-fleet.com/49245/american-airlines-switches-to-electric-gse-fleet), 28 Mayıs 2018
- Andrea, D. (2010). Battery Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs. Norwood: Artech House.
- Ateş, S. S. (2016). Yer Hizmetleri Kavramı ve Gelişimi. İçinde V. Durmaz (Ed.), Yer Hizmetleri Yönetimi. Anadolu Üniversitesi.
- Aubin, B. R. (2004). Aircraft Maintenance. SAE International.



- Çelik, R., & Toprak, Z. F. (2016). Küresel İklim Değişikliğinin Diyarbakır Kent Merkezi Yeraltı Suyu Seviyesine Etkisi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 7(2), 279–290.
- Çelik, S., Bacanlı, H., & Görgeç, H. (2008). Küresel İklim Değişikliği ve İnsan Sağlığına Etkileri. *Delta*. (2013). Delta, CTE Work Together To Reduce GSE Carbon Emissions At ATL. [http://www.aviationpros.com/press\\_release/10943131/delta-cte-work-together-to-reduce-gse-carbon-emissions-at-atl](http://www.aviationpros.com/press_release/10943131/delta-cte-work-together-to-reduce-gse-carbon-emissions-at-atl), 28 Mayıs 2018,
- DHMI. Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMI) Genel Müdürlüğünün 06 Temmuz 2018 gün ve 40543931-301.99-E.72562 sayılı yazısı (2018). Ankara: DHMI.
- Fleuti, E. (2014). Aircraft Ground Handling Emissions Methodology and Emission Factors Zurich Airport. Zurich Airport, 20.
- Fontela, P., Soria, A., Mielgo, J., Sierra, J. F., de Blas, J., Gauchia, L., & Martínez, J. M. (2007). Airport electric vehicle powered by fuel cell. *Journal of Power Sources*, 169(1), 184–193. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.01.056>
- IATA. (2013). Technology Roadmap.
- IATA, More Than 7% increase in Air Travel Compared to Last Year, 2017, <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2017-10-09-01.aspx>, 13 Ekim 2017
- ICAO. (2011). Airport Air Quality Manual.
- Idaho National Laboratory. (2013). Electric Ground Support Equipment Advanced Battery Technology Demonstration Project at the Ontario Airport.
- Koch, B. (2010). Aviation Strategy and Business Model. İçinde A. Wald, C. Fay, & R. Gleich (Ed.), *Introduction to Aviation Management*. Berlin: LIT Verlag.
- Korul, H. (2016). Yer Hizmetlerinde Kullanılan Ekipmanlar. İçinde V. Durmaz (Ed.), *Yer Hizmetleri Yönetimi*. Anadolu Üniversitesi.
- Marais, K., & Waitz, I. A. (2009). Air Transport and the Environment. İçinde P. Belobaba, A. Odoni, & C. Barnhart (Ed.), *The Global Airline Industry*. London: John Wiley & Sons.
- Marangoz, M. (2004). İşletmelerin Çevresel Sorumluluğu : Türk Otomotiv Sanayine Yönelik Bir Araştırma. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 6(3), 75–97.
- Morrow, K., Hochard, D., & Francfort, J. (2007). Cost Benefit Analysis Modeling Tool for Electric vs. ICE Airport Ground Support Equipment - Development and Results.
- NAS. (2012). Airport Ground Support Equipment (GSE): Emission Reduction Strategies, Inventory, and Tutorial.
- NREL. (2017). Electric Ground Support Equipment at Airports.
- Pfaffmann-Powell, R. (2014). Americans' aging autos. *Beyond the Numbers: Prices & Spending*, 3(9).
- Rahn, D. C., & Wang, C.-Y. (2013). *Battery Systems Engineering*. Wiley.
- Rajagopalan, S., Harley, R. G., Lambert, F., Addy, M., Franklin, A., & Clappier, P. (2003). Power quality impacts of airport ground support equipment charging systems. İçinde 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491) (ss. 1226–1231). IEEE. <http://doi.org/10.1109/PES.2003.1270504>
- SHGM. SHY-22 (2016). Resmî Gazete Sayı : 29810.
- SHGM. (2017). Yeşil Havaalanı Projesi Sektörel Kriterler Dokümanı, [http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/pdf/kurumsal/projeler/Yesil\\_Havaalani\\_Projesi\\_sektorel\\_kriterler.PDF](http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/pdf/kurumsal/projeler/Yesil_Havaalani_Projesi_sektorel_kriterler.PDF), 25 Ağustos 2018
- Silvester, S., Beella, S. K., Van Timmeren, A., Bauer, P., Quist, J., & Van Dijk, S. (2013). Exploring design scenarios for large-scale implementation of electric vehicles; The Amsterdam Airport Schiphol case. *Journal of Cleaner Production*, 48, 211–219. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.053>
- Smith, S. (2013). Electric GSE Buying Trends Report.
- Soruşbay, C. (2003). Karayolu Ulaşımından Kaynaklanan Karbondioksit Emisyonlarının Çevreye Etkisi ve Kontrolü. *Mühendis ve Makina*, s.564(c:48), 22–26.
- Soydan, Y. (2016). Elektrikli ve Konvansiyonel Otomobil Tribolojisi: Yeni Eğilimler ve Uygulamalar. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 7(3), 527–536.
- Stettler, M. E. J., Eastham, S., & Barrett, S. R. H. (2011). Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions. *Atmospheric Environment*, 45(31), 5415–5424. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.012>
- Štimac, I., Vince, D., Jakšić, B., & El, M. I. (2013). Model of Environment -Friendly Aircraft Handling – Case Study: Zagreb Airport, 1–12.
- Tabares, D. A., & Mora-Camino, F. A. C. (2017). Aircraft Ground Handling: Analysis for Automation. İçinde 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (s. 16). Denver, United States.
- TGS. (2017). TGS Sera Gazı Raporu. [https://www.tgs.aero/politikalar/Sera\\_Gazi\\_Raporu11.pdf](https://www.tgs.aero/politikalar/Sera_Gazi_Raporu11.pdf), 20 Ağustos 2018
- Thomas, M. (2016). Airline's other fleet: Science behind ground equipment, <http://news.delta.com/airline-s-other-fleet-science-behind-ground-equipment>, 28 Mayıs 2018
- Wensveen, J. G. (2007). *Air Transportation: A Management Perspective (Sixth)*. İngiltere: Ashgate.
- Winther, M., Kousgaard, U., Ellermann, T., Massling, A., Nøjgaard, J. K., & Ketzel, M. (2015). Emissions of NO<sub>x</sub>, particle mass and particle numbers from aircraft main engines, APU's and handling equipment at Copenhagen Airport. *Atmospheric Environment*, 100(x), 218–229. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.10.045>
- Yildiz, M., & Karakoc, T. H. (2016). Studying and sizing of batteries for efficient battery management in aviation applications. İçinde 6th EASN International Conference On Innovation in European Aeronautics Research. Porto.
- Zero-Emission Airport Ground Support Equipment (2018), <https://www.arb.ca.gov/msprog/offroad/gse/gse.htm>, 28 Mayıs 2018



## ALOE VERA'NIN GIDA ENDÜSTRİSİNDE KULLANIMI

Gülden BAŞYİĞİT KILIÇ\*, Damla BİLECEN ŞEN, Dania ALNAKDALI, Müberra GÜLŞEN

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Aloe Vera,*  
*Gıda Endüstrisi,*  
*Antioksidan,*  
*Antimikrobiyal.*

### Öz

*Aloe barbadensis* Miller (*Aloe vera*); doğal tedavi edici özelliklerinin geniş çaptaki çeşitliliği nedeniyle, eski medeniyetler tarafından binlerce yıldır kullanılan şifalı bir bitkidir. Yanıkların tedavisinde ve yaraları iyileştirmede kullanılan *Aloe vera*; ayrıca çeşitli vitaminler, mineraller, amino asitler ve enzimler içeren yapısıyla besleyici özelliğe de sahiptir. *Aloe vera*'nın besin değeri yüksek gıda katkı maddesi olarak; gıdaların kalitesini arttırmak ve raf ömrünü uzatmak amacıyla kullanılmasının yanı sıra, doğal yenilebilir film ve kaplama materyali olarak da değerlendirildiği görülmektedir. Bu çalışmada *Aloe vera*'nın gıda endüstrisinde doğal antioksidan ve antimikrobiyal madde olarak kullanımı hakkında bilgi verilmesi amaçlanmış olup, gıda sanayinde *Aloe vera*'nın kullanımı ile ilgili son yıllarda yapılan araştırma sonuçları derlenmiştir.

## THE USE OF ALOE VERA IN FOOD INDUSTRY

### Keywords

*Aloe Vera,*  
*Food Technology,*  
*Antioxidant,*  
*Antimicrobial.*

### Abstract

*Aloe barbadensis* Miller (*Aloe vera*) is a medicinal herb that has been used by ancient cultures for thousands of years because of its wide range of natural therapeutic properties. *Aloe vera* is used to treat burns and to heal wounds. It also has nutritive properties containing vitamins, minerals, amino acids and enzymes. It is seen that *Aloe vera* is used as a food additive with high nutritional value in order to increase the quality of food and extend the shelf life. It has also been used as the natural edible film and coating materials. The aim of this study was to give information about the use of *Aloe vera* as a natural antioxidant and antimicrobial agent in the food industry. Thus in this review study, researches about the use of *Aloe vera* in the food industry are reviewed.

### Alıntı / Cite

Başyığıt Kılıç, G., Bilecen Şen, D., Alnakdalı, D., Gülşen, M., (2020). *Aloe Vera'nın Gıda Endüstrisinde Kullanımı*, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 326-332.

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

G. Başyığıt Kılıç, 0000-0003-1211-0568  
D. Bilecen Şen, 0000-0003-3243-923X  
D. Alnakdalı, 0000-0002-9181-6106  
M. Gülşen, 0000-0003-4876-5603

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	08.05.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	16.07.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	18.07.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	20.03.2020

## 1. Giriş (Introduction)

*Aloe barbadensis* Miller (*Aloe vera*); eski medeniyetler tarafından binlerce yıldır kullanılan şifalı bir bitkidir. *Aloe vera*'nın ilk belgelenmiş kullanımına, M.Ö. 3500 yılında yazılmış olan Mısır papirüslerinde rastlanmıştır (Christaki ve Florou-Paneri, 2010). *Aloe* kelimesinin kökeni Arapçada "ışıltili acı madde" anlamına gelen "alloeh" kelimesine dayanmakta, vera ise Latince "doğru" anlamına gelmektedir. 2000 yıl önce, Yunan bilim adamları *Aloe vera* bitkisini "universal panacea" yani "her derde deva ilaç" olarak adlandırmıştır. Mısırlılar ise *Aloe vera*'yı ölümsüzlük bitkisi olarak isimlendirmiştir (Surjushe vd., 2008).

*Aloe vera* tıbbi özelliklerinin yanı sıra, süs bitkisi olarak da dünya çapında yaygın bir şekilde yetiştirilmektedir. Tropikal ve subtropikal bölgelerde yetişen *Aloe vera*; gri yeşilden parlak yeşile kadar değişen renklerde, üçgen şeklinde etli yapraklara sahip ve yapraklarının kenarlarında küçük beyaz dişler bulunan, kaktüs benzeri bir

\* İlgili yazar / Corresponding author: gklic@mehmetakif.edu.tr, +90-248-213-2724

bitkidir (Christaki ve Florou-Paneri, 2010). Aloe vera yaprakları; antioksidan özelliğe sahip biyoaktif bileşikler ve gıda endüstrisinde geniş kullanım alanına sahip mannanlar, antrakınon, C-glikozit ve lektin gibi ajanlar açısından zengindir (Rodriguez vd., 2010). Aloe vera yaprakları; lateks ve jel olmak üzere iki temel bileşene ayrılmaktadır. "Aloe suyu" veya "aloe özü" olarak adlandırılan ve bütün yaprağın yaklaşık %20-30'unu içeren lateks; yapraklardaki epidermisin altında bulunan perisiklik tübüllerden çıkan acı ve sarı bir sıvıdır (Boudreau ve Beland, 2006). Aloe vera lateksi, hem yüksek miktarlarda fenolik bileşikler içermekte, hem de Gram pozitif bakterilere karşı antibakteriyel özellik göstermektedir (Boudreau ve Beland, 2006; Surjushe vd., 2008; Alemdar ve Agaoglu, 2009). Aloe vera jeli ise; taze yapraklardaki parenkimatoz hücrelerinden elde edilen ve yaprak ağırlığının yaklaşık %70-80'ini oluşturan, renksiz ve yapışkan bir jeldir. Bu jel; terapötik, antibakteriyel ve antifungal etkileri, biyolojik bozunabilirlik, aroma verici ve koruyucu özellikleri nedeniyle; içecekler, dondurmalar ve şekerlemelerde fonksiyonel gıda kaynağı olarak kullanılmaktadır (Eshun ve He, 2004; Boudreau ve Beland, 2006). Ayrıca Aloe vera jeli; farklı gıda türleri için yenilebilir ve biyolojik olarak güvenilir koruyucu film ve kaplama materyali olarak da kullanılabilir (Valverde vd., 2005). Aloe vera jelin; mukopolisakkaridler, enzimler ve steroller gibi 75'den fazla bileşen; salisilatlar, magnezyum laktat gibi birçok biyoaktif bileşikler ve antioksidan aktivitesi olan en az yedi süperoksit dismutaz içerdiği tespit edilmiştir (Vogler ve Ernst, 1999).

Aloe vera'nın besin değeri yüksek gıda katkı maddesi olarak; gıdaların kalitesini arttırmak ve raf ömrünü uzatmak amacıyla kullanıldığı ve bunun yanı sıra, doğal yenilebilir film ve kaplama materyali olarak da değerlendirildiği görülmektedir (Eshun ve He, 2004; Serrano vd., 2006). Gıdalara ilave edilmiş Aloe vera'nın ürünlerin tadını ya da görünüşünü etkilemediği, bu nedenle de geleneksel sentetik koruyuculara karşı daha güvenilir, doğal ve çevre dostu bir alternatif olabileceği öngörülmektedir (Serrano vd., 2006). Buna ilaveten Aloe vera'nın genel olarak; antimikrobiyal, antienflamatuvar, antidiyabetik, antikarsinojenik özellikleri, bağışıklık ve gastrointestinal sistem üzerindeki olumlu etkileri ve nemlendirici ve yaşlılık karşıtı özelliklerinden dolayı sağlık ve kozmetik alanlarında da kullanıldığı bilinmektedir (Hu vd., 2003; Valverde vd., 2005).

Bu çalışmada Aloe vera'nın gıda endüstrisinde doğal antioksidan ve antimikrobiyal madde olarak kullanımı hakkında bilgi verilmesi amaçlanmış olup, gıda sanayinde Aloe vera'nın kullanımı ile ilgili son yıllarda yapılan araştırma sonuçları derlenmiştir.

## 2. Et Teknolojisinde Aloe Vera Kullanımı (Using Aloe Vera in Meat Technology)

Aloe vera'nın antioksidan özelliğe sahip fenolik bileşikler bakımından zengin olduğu ve geniş bir antimikrobiyal ve antiviral etki spektrumu gösterdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle et endüstrisinde Aloe vera kullanımı ile ürünlerdeki lipit oksidasyonun ve mikrobiyolojik bozulmaların büyük ölçüde engellendiği bildirilmiştir. Jairath vd. (2015)'nin araştırmasında %3 oranında Aloe vera jeli ile kaplanmış ve sonrasında modifiye atmosfer (50:50, CO<sup>2</sup> ve N<sub>2</sub>) koşullarında paketlenmiş keçi eti parçalarının; 4 °C'de 42 gün boyunca depolanması sonucunda tiyobarbitürik asit reaktif ürünleri ve serbest yağ asidi değerlerinin, kaplama ve paketlenme uygulanmamış gruplara göre anlamlı bir şekilde düşük olduğu bildirilmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda Aloe vera jel uygulanmış keçi eti parçalarının fizikokimyasal, yapısal, mikrobiyolojik ve duyuşal özellikleri etkilenmeden, modifiye atmosfer koşulları altında 42 günden daha fazla depolanabileceği de vurgulanmıştır. Benzer şekilde Jairath vd. (2016) tarafından yapılmış bir başka çalışmada ise; %3 oranında Aloe vera jel ile kaplanmış keçi eti parçalarının; 4 °C'de 30 gün depolama süresi boyunca düşük tiyobarbitürik asit reaktif madde değerlerine sahip olduğu, bu nedenle de etlerin oksidatif ve renk stabilitesinin ve duyuşal özelliklerinin korunduğu tespit edilmiştir.

Bishnoi ve Ahlawat (2015) tarafından yapılan araştırma sonucunda, %4 Aloe vera ve %2 arjun ağacı kabuğu ekstraktları ilave edilerek hazırlanmış bufalo etlerinin, daha iyi duyuşal ve yapısal özelliklere sahip olabileceği ifade edilmiştir. Rajkumar vd. (2016) tarafından yapılmış bir çalışmada ise, %2.5 ve %5 oranlarında Aloe vera jeli ilave edilerek, keçi etinden hazırlanmış nuggetlara ait pH değerlerinin 4 °C'de 9 günlük depolama süresince azaldığı ve lipit oksidasyonun ve mikrobiyal gelişimin geciktirildiği ifade edilmiştir. Ayrıca, %2.5 oranında Aloe vera jel içeren nuggetların panelistler tarafından daha çok tercih edildiği ve bu nedenle Aloe vera jeli ilavesinin nuggetlardaki duyuşal, yapısal ve besleyici değeri etkilemeden kaliteyi iyileştirmek için kullanılabileceği vurgulanmıştır. Benzer şekilde Soltanzadeh ve Ghiasi-Esfahani (2015) tarafından yapılmış bir çalışmada; %1, 3 ve 5 oranlarında Aloe vera jeli ilave edilmiş sığır eti köftelerinde, 7 günlük depolama süresince pişirme kayıplarının azaldığı, su tutma kapasitesi ve oksidatif stabilitenin arttığı, tekstürün geliştiği, özellikle %3 Aloe vera ilave edilmiş ürünlerin panelistler tarafından en yüksek puanı aldığı belirtilmiştir.

Kesim sonrası çiğ kanatlı etlerinde soğukta depolanma şartlarında bile 4-10 gün arasında bozulma meydana gelmektedir. Bu nedenle kanatlı etlerinin raf ömrünü uzatmak amacıyla Aloe vera'nın etkisinin araştırıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Bhat ve Kumar (2014) tarafından yapılmış bir çalışmada; %5, 10 ve 15 oranlarında Aloe vera pulpu ilave edildikten sonra düşük yoğunluklu polietilen torbalarda, 4 °C'de 21 gün boyunca depolanmış tavuk nuggetlardaki lipit oksidasyon değerlerinin, toplam ve psikrofilik canlı, küf ve maya sayılarının Aloe vera

ilave edilmemiş kontrol grubuna kıyasla önemli ölçüde düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Aloe vera ilavesinin nuggetlardaki nem içeriğini, emülsiyon stabilitesini ve pişirme verimini arttırdığı ve duyuşal özellikleri etkilemediği vurgulanmıştır. Kumar ve Langoo (2016)'nın çalışmasında ise, tavuk eti kıymasına ilave edilmiş %0.25 oranlarında Aloe vera, yeşil çay ve amla ekstraktlarının sentetik antioksidan olan bütillenmiş hidroksi tolüen (BHT)'e karşı antimikrobiyal ve antioksidan etkileri karşılaştırılmıştır. 4 °C' de 12 gün boyunca depolanmış örneklerin; toplam antioksidan ve radikal süpürücü aktivitelerinin BHT kadar yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca Aloe vera ekstrakt ilavesinin diğer doğal ekstraktlara göre daha az mikrobiyal inhibisyon ile sonuçlandığı da ifade edilmiştir.

Protein olmayan azot, su aktivitesi ve pH değerleri yüksek olan balık ve diğer su ürünleri de; mikrobiyolojik ve oksidatif bozulmalara karşı oldukça duyarlıdır. Bu nedenle yapılmış bazı çalışmalarda, su ürünlerinin kalitesini ve raf ömrünü korumak için Aloe vera bitkisinin kullanıldığı görülmektedir. Soltanzadeh ve Mousavinejad (2015) tarafından yapılmış bir çalışmada; karideslere uygulanmış %75 ve %100 oranlarında Aloe vera jeli kaplamasının, 4 °C'de 7 gün depolama süresi boyunca lipid oksidasyonu önlediği, yapısal özelliklerini koruduğu ve duyuşal kalite üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu bildirilmiştir.

### 3. Süt Teknolojisinde Aloe Vera Kullanımı (Using Aloe Vera in Dairy Technology)

Aloe vera mide, ince bağırsak ve kolonun düzgün çalışmasına yardımcı olan en az üç anti-inflamatuar yağ asidi içermektedir (Kumar ve Bhowmik, 2010). Bu nedenle Aloe vera'nın probiyotik veya fonksiyonel süt ve süt ürünleri üretiminde kullanıldığı görülmektedir. Panesar ve Shinde (2012) tarafından yapılmış bir çalışmada, Aloe vera takviyeli probiyotik yoğurtlara ait sinerezis değerlerinin 4 °C'de 28 gün depolama süresi boyunca %4.7'den %8.3'e yükseldiği, pH değerlerinin 4.03'ten 3.91'e düştüğü, *Lactobacillus acidophilus* sayılarının 39.7x10<sup>9</sup> KOB/ml'den 32.1x10<sup>9</sup> KOB/ml'ye düştüğü ve *Bifidobacterium bifidum* sayılarının ise 16.9x10<sup>9</sup> KOB/ml'den 7.3x10<sup>9</sup> KOB/ml'ye düştüğü belirtilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, Aloe vera ilavesi ile yoğurtların; önerilen seviyeden daha fazla bakteri bulundurmasından dolayı yeterli bir probiyotik ürün olarak kullanılabilceği vurgulanmıştır.

Mudgil vd. (2016) tarafından; ayranlara %5-20 oranlarında ilave edilmiş Aloe vera suyunun, ayranlardaki faz ayrıştırmasını azalttığı ve vizkoziteyi arttırdığı bildirilmiştir. Ayrıca %10 oranında Aloe vera suyu ilave edilmiş ayranların, panelistler tarafından en yüksek puanı aldığı ve Aloe vera suyu takviyesinin ayranlardaki besleyici, fizikimyasal ve duyuşal özellikleri geliştirdiği vurgulanmıştır. Bassannavar vd. (2014) tarafından fermente sültere %0.5 ve %1 oranlarında ilave edilmiş Aloe vera jeli tozunun; anjiyotensin-dönüştürücü enzim (ACE) inhibitör aktivitesinde ve fermentasyon sırasında proteolizin derecesinde artışa neden olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, Aloe vera tozu ilavesinin 7 günlük depolama süresince fermente süt içerisindeki *Lactobacillus casei* NCDC19'un canlı sayımlarında artışa (> 11 log KOB/ml) neden olduğu ve sayımların depolama boyunca yüksek bir şekilde muhafaza edildiği vurgulanmıştır. Karami (2017) tarafından İran'a özgü yoğurtlu bir içecek olan "Doogh" daki *L. acidophilus* suşunun logaritmik bakteri sayısının, kekik ve 10 mg/l Aloe vera ekstraktları ilavesiyle arttığı ve özellikle çinko ve Aloe vera ekstraktlarının birlikte kullanılması ile en yüksek probiyotik bakteri sayısının elde edildiği bildirilmiştir. Verma vd. (2018) tarafından yapılmış bir çalışmada ise; %10 Aloe vera suyu ve %0.5 nane aroması ilave edilerek hazırlanmış dondurmaların, %5 ve %15 Aloe vera suyu içeren diğer dondurmalara göre toplam kuru madde, asitlik, protein, karbonhidrat ve kül miktarları gibi kimyasal ve toplam canlı ve koliform sayısı gibi mikrobiyolojik parametreler açısından daha iyi özelliklere sahip olduğu ve panelistler tarafından daha çok beğenildiği belirtilmiştir.

### 4. Meyve ve Sebze Teknolojisinde Aloe Vera Kullanımı (Using Aloe Vera in Fruit and Vegetable Technology)

Aloe vera'nın, antimikrobiyal bir etkiye sahip olduğu ve bu nedenle meyve ve sebzelerin kalitesini arttırmak ve raf ömrünü uzatmak amacıyla kullanıldığı görülmektedir. Alemdar ve Agaoglu (2009) tarafından yapılmış bir çalışmada, Aloe vera'dan elde edilmiş meyve suyunun *Mycobacterium smegmatis*, *Klebsiella pneumoniae*, *Enterococcus faecalis*, *Micrococcus luteus*, *Candida albicans* ve *Bacillus sphericus*'a karşı antimikrobiyal etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Aloe vera jelin *in vitro* ortamda *Penicillium digitatum* ve *Botrytis cinerea*'a karşı antimikrobiyal etkisinin araştırıldığı Castillo vd. (2010) tarafından yapılmış bir çalışmada ise; 250 ml/l Aloe vera jelin *P. digitatum* üzerinde 4 log KOB/g, *B. cinerea* üzerinde ise 2 log KOB/g azalmaya sebep olduğu belirtilmiştir.

Aloe vera'nın probiyotik ajanların büyümesini teşvik eden bir bitki olduğu ve bu nedenle pek çok ülkede malnütrisyon, kronik diyare ve gastrointestinal hastalıkların tedavisi ve önlenmesi için uzun süredir kullanıldığı görülmektedir. Nagpal vd. (2012) tarafından, %5 oranında hazırlanmış Aloe vera suyunun; *L. acidophilus*, *L. plantarum* ve *L. casei* gelişimini desteklediği belirtilmiştir.

Meyve ve sebzelerde hasat sonrası oluşabilecek olumsuzlukları en aza indirmek için uygulanan kimyasalların yerine, doğal bir alternatif olarak Aloe vera jeli esaslı yenilebilir film ve kaplamaların kullanıldığı da

bildirilmektedir. Valverde vd. (2005) tarafından hasat sonrası sofralık üzümde; hızlı ağırlık kaybı, renk değişikliği, yumuşama ve olgunlaşma meydana geldiği ve 1 °C'de depolanan üzümlerin 7, 20 °C'de depolanan üzümlerin 4 günlük raf ömrü süresinde hızlı bir şekilde bozulduğu bildirilmiştir. Aloe vera jeli esaslı kaplama uygulaması ile üzümlerdeki fiziksel değişikliklerin önemli ölçüde geciktirildiği ve raf ömrünün 1 °C'de 35 güne kadar uzatılabildiği belirtilmiştir. Ayrıca, yenilebilir kaplamanın hem mezofilik aerobik, hem de maya ve küfler için başlangıç mikrobiyal sayılarını azaltabildiği ve kaplama uygulamasının tat ve aroma üzerinde herhangi olumsuz bir etkisi olmadığı vurgulanmıştır. Benzer şekilde Serrano vd. (2006)'nın çalışmasında, hasat sonrası sofralık üzümlerde Aloe vera jeli esaslı yenilebilir kaplamanın; toplam fenolik ve askorbik asit gibi bileşiklerin kaybını azalttığı ve oksidasyonu geciktirdiği belirtilmiştir. Hassanpour (2015) ise, Aloe vera jeli ile kaplanmış ahududu meyvelerinin, kaplama uygulanmamış diğer meyvelere göre daha fazla antioksidan kapasiteye sahip olduğunu ve yüksek miktarda toplam antosiyanin, toplam fenol ve antioksidan enzimler içerdiğini belirtmiştir.

Bu araştırmaların dışında; Castillo vd. (2010) tarafından, hasat öncesi sofralık üzüm bağlarına uygulanmış 250 ml/l Aloe vera jelin; 35 gün boyunca depolanan üzümlerdeki solunum hızı ve ağırlık kaybını azalttığı ve mezofilik aerobik ve küf-maya sayılarını önemli ölçüde düşürdüğü belirtilmiştir. Martinez-Romero vd. (2006) tarafından, hasat sonrası tatlı kirazların kalitesini ve güvenliğini korumak için uygulanmış Aloe vera jeli esaslı yenilebilir kaplamaların ise diğer çalışmalarla benzer şekilde; kirazlardaki solunum hızını, ağırlık kaybını ve renk değişimlerini sınırlandırdığı ve olgunlaşmayı ve mikrobiyal gelişmeyi engellediği ifade edilmiştir. Hasat sonrası ananasların kalitesinin ve raf ömrünün araştırıldığı Adetunji vd. (2012) tarafından yapılmış bir çalışmada ise; Aloe vera jeli esaslı yenilebilir kaplama uygulamasının, 27 °C'de 7 hafta boyunca depolanan ananaslara ait ağırlık kaybı, askorbik asit, pH ve sertlik gibi parametreleri önemli ölçüde kontrol ettiği belirtilmiştir. Hasat sonrası nem kayıplarının azaltılması; meyve ve dış ortam arasında bir su bariyeri oluşturabilen Aloe vera jelin, higroskopik özelliği ile açıklanmıştır (Misir vd., 2014). Ergun ve Satici (2012) tarafından; yeşil renkli "Granny Smith" ve kırmızı renkli "Red Chief" elmaları; 2 °C'de 6 ay süre ile depolayabilmek ve kalite kayıplarını önleyebilmek için biyokoruyucu olarak Aloe vera jeli (%1, 5 ve 10) esaslı kaplamaların kullanılabileceği tespit edilmiştir. Amanullah vd. (2016) tarafından, hasat sonrası 10 °C'de depolanan patlıcanlara uygulanmış %0.5 oranında Aloe vera jeli esaslı kaplamanın; patlıcanların olgunlaşmasını geciktirdiği ve patlıcanlara ait kilo kaybı, pH değeri, sertlik ve buruşukluk gibi fiziksel ve kimyasal parametreleri azalttığı belirtilmiştir.

Ayrıca hasat sonrası meyve çürümelerine sebep olan fungal bozulmaların, büyük ekonomik kayıplara yol açabileceği de vurgulanmış ve bunu önleyebilmek için bazı çalışmalar yapılmıştır. Nabigol ve Asghari (2013) tarafından yapılmış bir çalışmada; 60, 125 ve 250 ml/L konsantrasyonlarda hazırlanmış Aloe vera jel esaslı kaplamaların, 21 gün boyunca soğukta depolanan nar tanelerinde çürümeye yol açan *P. digitatum* ve *Aspergillus niger*'in gelişimini inhibe ettiği ve titrasyon asitliği gibi olgunlaşma parametrelerini önemli ölçüde geciktirdiği belirtilmiştir. Padmaja ve Bosco (2014) tarafından yapılmış bir çalışmada ise Aloe vera jeli esaslı kaplamaların, düşük yoğunluklu polietilen torbalarda depolanan hünnap meyvelerinin (*Ziziphus mauritiana*) fizikokimyasal özelliklerini koruduğu ve meyvelerin 5 °C'de raf ömrünü 45 güne kadar uzattığı belirtilmiştir. Ayrıca yenilebilir kaplama ile birlikte meyve yüzeylerinin potasyum metabisülfid ile temizlenmesiyle, hem bakteriler hem de funguslar için başlangıç mikrobiyal yüklerin azaltılabildiği vurgulanmıştır.

Vieira vd. (2016) tarafından; hasat sonrası 5 °C'de depolanan yaban mersini (*Vaccinium corymbosum*) meyvelerine uygulanmış %0.5 oranında Aloe vera ekstraktı içeren kitosan (%0.5) esaslı yenilebilir kaplamaların, meyvelerdeki mikrobiyolojik gelişimi ve su kaybını azalttığı belirtilmiştir. Kaplama uygulanmamış meyvelerdeki küf gelişiminin 2 günlük depolama sonucunda 2 log KOB/g, kaplama uygulanmış örneklerde ise 9 gün depolamadan sonra küf gelişiminin 1.3 log KOB/g olduğu bildirilmiştir. Ayrıca araştırmacılar tarafından; Aloe vera ekstraktı içeren kitosan esaslı yenilebilir kaplamaların, meyvelerin raf ömrünü yaklaşık 5 gün uzattığı ve hasat sonrası kontaminasyonu azaltmak için büyük bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmıştır. Aloe vera'nın; hasat sonrası meyvelerin raf ömrünü uzatmasının yanı sıra, depolama süresi boyunca ürünlerin duyu özelliklerini de koruduğu görülmektedir. Benitez vd. (2015) tarafından Aloe vera esaslı yenilebilir kaplamaların, kivilerin sertliğini koruduğu ve olgunlaşmayı engelleyerek askorbik asit kayıplarını ve sararmayı önlediği bildirilmiştir.

Aloe vera bitkisinin etkinliğini arttırmak için diğer antimikrobiyal ve antioksidan maddeler ile birlikte kullanıldığı da bildirilmektedir. Paladines vd. (2014) tarafından Aloe vera jeli, tek başına veya %10 ve %2 oranlarında kuşburnu yağı ilavesiyle şeftali, erik, nektarin ve tatlı kiraz gibi çeşitli meyvelerde yenilebilir kaplama olarak kullanılmıştır. 20 °C'de 6 gün boyunca depolanan meyvelerde; kuşburnu yağının Aloe vera esaslı kaplamalara ilave edilmesiyle meyvelerdeki ağırlık kaybı, yumuşama, renk değişimi ve olgunlaşma gibi parametrelerin geciktirildiği ve solunum miktarı ve etilen üretiminin azaldığı ifade edilmiştir. Shahkoomahally vd. (2014) %2 kalsiyum klorür ve %1 sitrik asit ilave edilmiş Aloe vera jeli esaslı yenilebilir kaplamaların, 4 °C'de %85 bağıl nemde 35 gün boyunca depolanan sofralık üzümlerdeki askorbik asit miktarlarını sabit tuttuğu, ağırlık kayıplarını, esmerleşme ve dehidrasyon reaksiyonlarını geciktirdiği belirtilmiştir. Sogvar vd. (2016) tarafından; hasat sonrası çileklere uygulanmış %1, 3 ve 5 oranlarında askorbik asit ilave edilmiş Aloe vera jeli esaslı yenilebilir kaplamaların;

çileklerdeki ağırlık kaybını geciktirdiği, toplam aerobik mezofilik, maya ve küf popülasyonlarını azalttığı ve çözünür katı madde içeriğini, C vitamini konsantrasyonunu ve titrasyon asitliğini arttırdığı tespit edilmiştir.

Aloe vera bitkisi ilave edilerek hazırlanmış içeceklerin, tat ve görünüş olarak tüketici üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığı ve bu nedenle doğal ve çevre dostu bir alternatif olarak meyve sularında besleyici değeri, kaliteyi ve güvenliği arttırmak için kullanılabilmesi belirtilmektedir. Boghani vd. (2012) tarafından yapılmış bir çalışmada; farklı oranlarda papaya ve Aloe vera suyu karışımı ile hazırlanmış tüketime hazır içecekler arasından, Aloe vera suyunun en yüksek hedonik puana ulaştığı ve bu içeceklerin kimyasal yapılarında önemli değişiklikler olmaksızın, 3 aylık bir süre boyunca soğuk koşullarda başarılı bir şekilde depolanabileceği bildirilmiştir. Hamid vd. (2014)'nin araştırmasında, portakal ve havuç karışımı nektarlara %10 ve %40 oranlarında Aloe vera jeli ilavesinin; 3 aylık depolama süresince nektarların görünür viskozite, kül, ham lif, indirgen şeker ve toplam fenolik madde miktarlarında ve DPPH inhibisyonunda artışa neden olduğu belirtilmiştir. Ayrıca Aloe vera jel takviyesi ile esmerleşme reaksiyonları ve renk değişimleri üzerine etkileri olan askorbik asit ve  $\beta$ -karoten miktarlarının, depolama süresince stabil kaldığı bildirilmiştir. Aloe vera jelinin *Bacillus cereus* ve *Staphylococcus aureus*'a karşı maksimum inhibisyon zonu gösterdiği ve depolama süresi boyunca %40 oranında Aloe vera jelinin nektarlardaki toplam bakteri sayılarını ve küf-maya seviyelerini azalttığı vurgulanmıştır. Sharma vd. (2015)'nin çalışmasında Aloe vera kullanılarak lezzetli ve fonksiyonel içecekler geliştirilmiş ve geliştirilen bu ürünlerin besinsel, fonksiyonel ve duyusal özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, hazırlanmış olan tüketime hazır içecek hariç geliştirilmiş diğer saf ve tatlandırılmış Aloe vera suyu ve meşrubat ürünlerinin, *Escherichia coli*'ye karşı antimikrobiyal aktivite gösterdiği bildirilmiştir. Ayrıca maksimum inhibisyon zonunun 25.7 mm olarak saf Aloe vera suyunda gözlemlendiği; minimum inhibisyon zonunun ise 12.10 mm olarak meşrubatta gözlemlendiği ifade edilmiştir. Benzer şekilde, saf Aloe vera suyunun %71.81 oranında en yüksek antioksidan aktiviteye sahip olduğu; tüketime hazır içeceğin ise en düşük antioksidan aktivite sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca panelistler tarafından ise tatlandırılmış Aloe vera suyunun yüksek düzeyde kabul edilebilir olduğu vurgulanmıştır.

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

Aloe vera'nın doğal bir ürün olması sebebiyle gıda endüstrisinde zararsız katkı maddesi olarak kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Son yıllarda Aloe vera suyu, jeli ve pulpunun meyve suları, çaylar, çeşitli sütlü tatlılar, yoğurtlar ve farklı et ürünleri gibi gıda ürünlerinin formülasyonlarında da kullanımına yönelik çalışmaların arttığı görülmektedir.

Aloe vera'nın; et ve et ürünlerinde lipit oksidasyonu ve mikrobiyolojik bozulmaları engellediği, probiyotik veya fonksiyonel süt ve süt ürünleri üretiminde kullanıldığı ve meyve ve sebzelerin kalitesini arttırdığı ve raf ömrünü uzattığı görülmektedir. Ayrıca genel olarak Aloe vera'nın; antimikrobiyal, antienflamatuvar, antidiyabetik, antikarsinogenik özellikleri, bağışıklık ve gastrointestinal sistem üzerindeki olumlu etkileri ve nemlendirici ve yaşlılık karşıtı özelliklerinden dolayı sağlık ve kozmetik alanlarında da kullanıldığı bildirilmektedir.

Bu nedenle Aloe vera'nın; ülkemizdeki ürün çeşitliliğinin geliştirilmesi açısından, fonksiyonel gıdaların üretiminde kullanılması ve bu ürünlerin geliştirilerek gıda endüstrisine kazandırılmasının önemli olduğu düşünülmektedir.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

## Kaynaklar (References)

- Adetunji, C.O., Fawole, O.B., Arowora, K.A., Nwaubani, S.I., Ajayi, E.S., Oloke, J.K., Majolagbe, O.M., Ogundele, B.A., Aina, J.A., Adetunji, J.B., 2012. Effects of edible coatings from Aloe vera gel on quality and postharvest physiology of *Ananas comosus* (L.) fruit during ambient storage. *Global Journal of Science Frontier Research Bio-Tech and Genetics*, 12, 5(1), 39-43.
- Alemdar, S., Agaoglu, S., 2009. Investigation of *in vitro* antimicrobial activity of Aloe vera juice. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 8, 99-102.
- Amanullah, S., Jahangir, M.M., Ikram, R.M., Sajid, M., Abbas, F., Mallano, A.I., 2016. Aloe vera coating efficiency on shelf life of eggplants at differential storage temperatures. *Journal of Northeast Agricultural University*, 23, 4, 15-25.
- Bassannavar, S., Pothuraju, R., Sharma, R.K., 2014. Effect of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) on survivability, extent of proteolysis and ACE inhibition of potential probiotic cultures in fermented milk. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94, 2712-2717.
- Benitez, S., Achaerandio, I., Pujola, M., Sepulcre, F., 2015. Aloe vera as an alternative to traditional edible coatings used in freshcut fruits: A case of study with kiwi fruit slices. *LWT-Food Science and Technology*, 61, 84-193.
- Bhat, Z.F., Kumar, S., 2014. Effect of Aloe vera on the lipid stability and storage quality of chicken nuggets. *Nutrition and Food Science*, 45 (1), 54-67.

- Bishnoi, S., Ahlawat, S.S., 2015. Development of buffalo meat rolls incorporated with aloe vera gel and arjun tree bark extract. *Haryana Veterinarian*, 54 (2), 174-177.
- Boghani, A.H., Abdul, R., Syed, I.H., 2012. Development and storage studies of blended papaya-Aloe vera ready to serve (RTS) beverage. *Journal of Food Processing and Technology*, 3:10, 1-4.
- Boudreau, M.D., Beland, F.A., 2006. An evaluation of the biological and toxicological properties of *Aloe barbadensis* (Miller), Aloe vera. *Journal of Environmental Science and Health Part C*, 24(1), 103-154.
- Castilloa, S., Navarro, D., Zapata, P.C., Guillena, F., Valero, D., Serrano, M., Martinez-Romero, D., 2010. Antifungal efficacy of Aloe vera *in vitro* and its use as a preharvest treatment to maintain postharvest table grape quality. *Postharvest Biology and Technology*, 57(3), 183-188.
- Christaki, E.V., Florou-Paneri, P.C., 2010. Aloe vera: A plant for many uses. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8 (2), 245-249.
- Ergun, M., Satici, F., 2012. Use of Aloe vera gel as biopreservative for 'Granny Smith' and 'Red Chief' apples. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 22(2), 363-368.
- Eshun, K., He, Q., 2004. Aloe vera: A valuable ingredient for the food, pharmaceutical and cosmetic industries, A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44, 91-96.
- Hamid, G.H., El-Kholany, E.A., Nahla, E.A., 2014. Evaluation of Aloe vera gel as antioxidant and antimicrobial ingredients in orange-carrot blend nectars. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 3(4), 1122-1134.
- Hassanpour, H., 2015. Effect of Aloe vera gel coating on antioxidant capacity, antioxidant enzyme activities and decay in raspberry fruit. *LWT-Food Science and Technology*, 60, 495-501.
- Hu, Y., Xu, J., Hu, Q., 2003. Evaluation of antioxidant potential of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) extracts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 7788-7791.
- Jairath, G., Chatli, M.K., Sahoo, J., Biswas, A.K., 2015. Effect of packaging methods and crude aloe vera gel (*Aloe vera barbadensis* Miller) on the storage quality of enrobed goat meat bites. *Journal of Food Science and Technology*, 52(6), 3730-3738.
- Jairath, G., Chatli, M.K., Biswas, A.K., 2016. Comparative study on *in vitro* and *in vivo* evaluation of antioxidant potential of apple peel extract and aloe vera gel. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40, 607-614.
- Karami, M., 2017. The effect of zinc and vitamin B12 together with thyme and Aloe vera extracts on the viability of *Lactobacillus acidophilus* LA-5® and physicochemical properties of Iranian yoghurt drink (Doogh). *International Journal of Dairy Technology*, 71(1), 149-156.
- Kumar, K.P.S., Bhowmik, D., 2010. Aloe vera: A potential herb and its medicinal importance. *Journal of Chemical Pharmaceutical Research*, 2 (1), 21-29.
- Kumar, Y., Langoo, B.A., 2016. Effects of Aloe, green tea, and amla extracts on microbiological and oxidative parameters of refrigerated raw meat batter. *Agricultural Research*, 5 (1), 81-88.
- Martinez-Romero, D., Alburquerque, N., Valverde, J.M., Guillen, F., Castillo, S., Valero, D., Serrano, M., 2006. Postharvest sweet cherry quality and safety maintenance by Aloe vera treatment: A new edible coating. *Postharvest Biology and Technology*, 39, 93-100.
- Misir, J., Brishti, F.H., Hoque, M.M., 2014. Aloe vera gel as a novel edible coating for fresh fruits: A review. *American Journal of Food Science and Technology*, 2, 3, 93-97.
- Mudgil, D., Barak, S., Darji, P., 2016. Development and characterization of functional cultured buttermilk utilizing Aloe vera juice. *Food Bioscience* 15, 105-109.
- Nabigol, A., Asghari, A., 2013. Antifungal activity of Aloe vera gel on quality of minimally processed pomegranate arils. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4 (4), 833-838.
- Nagpal, R., Kaur, V., Kumar, M., Marotta, F., 2012. Effect of Aloe vera juice on growth and activities of *Lactobacilli in vitro*. *Acta BioMedica*, 83, 183-188.
- Padmaja, N., Bosco, S.J.D., 2014. Preservation of jujube fruits by edible Aloe vera gel coating to maintain quality and safety. *Indian Journal of Scientific Research and Technology*, 2(3), 79-88.
- Paladines, D., Valero, D., Valverde, J.M., Diaz-Mula, H., Serrano M., Martinez-Romero, D., 2014. The addition of rosehip oil improves the beneficial effect of Aloe vera gel on delaying ripening and maintaining postharvest quality of several stonefruit. *Postharvest Biology and Technology*, 92, 23-28.
- Panesar, P.S., Shinde, C., 2012. Effect of storage on syneresis, pH, *Lactobacillus acidophilus* count, *Bifidobacterium bifidum* count of Aloe vera fortified probiotic yoghurt. *Current Research in Dairy Science*, 4, 17-23.
- Rajkumar, V., Verma, A.K., Patra, G., Pradhan, S., Biswas, S., Chauhan, P., Das, A.K., 2016. Quality and acceptability of meat nuggets with fresh Aloe vera gel. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 29, 5, 702-708.
- Rodriguez, E.R., Martin, J.D., Romero, C.D., 2010. Aloe vera as a functional ingredient in foods, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50,4, 305-326.
- Serrano, M., Valverde, J.M., Guillen, F., Castillo, S., Martinez-Romero, D., Valero, D., 2006. Use of Aloe vera gel coating preserves the functional properties of table grapes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 3882-3886.
- Shahkoomahally, S., Ramezani, A., 2014. Effect of natural Aloe vera gel coating combined with calcium chloride and citric acid treatments on Grape (*Vitis vinifera* L. Cv. Askari) quality during storage. *American Journal of Food Science and Technology*, 2, 1, 1-5.
- Sharma, R., Tandon, D., Joshi, V.K., Attri, S., 2015. Development and evaluation of different beverages from *Aloe vera* (L.) Burm.f. for their nutritional, functional and sensory qualities. *Indian Journal of Natural Products and Resources*, 6(4), 278-282.
- Sogvar, O.B., Saba, M.K., Emamifar, A., 2016. Aloe vera and ascorbic acid coatings maintain postharvest quality and reduce microbial load of strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 114, 29-35.
- Soltanizadeh, N., Ghiasi-Esfahani, H., 2015. Qualitative improvement of low meat beef burger using Aloe vera. *Meat Science*, 99, 75-80.
- Surjushe, A., Vasani, E., Saple, D.G., 2008. Aloe vera: A short review. *Indian Journal of Dermatology*, 53, 163-166.
- Valverde, J.M., Valero, D., Anez-Romero, D.M., Guillen, F., Castillo, S., Serrano, M., 2005. Novel edible coating based on Aloe vera gel to maintain table grape quality and safety. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 7807-7813.

- Verma, A., Ansari, R., Broadway, A.A., 2018. Preparation of herbal ice cream by using Aloe vera with mint flavour. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(3), 391-394.
- Vieira, J.M., Flores-Lopez, M., Rodriguez, D.J., Sousaa, M.C., Vicente, A.A., Martins, J.T., 2016. Effect of chitosan-Aloe vera coating on postharvest quality of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 116, 88-97.
- Vogler, B., Ernst, E., 1999. Aloe vera: A systematic review of its clinical effectiveness. *The British Journal of General Practice*, 49(447), 823-828.