



Dicle Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

**mühendislikdergisi**  
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
**mühendislikdergisi**  
Cilt: 11, Sayı: 2, Haziran 2020 ISSN: 1309-8640

**Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilige Owner**  
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

**Baş Editör / Editor-in-Chief**  
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

**Alan Editörleri / Field Editors**  
Bilal GÜMÜŞ  
Abdulnasır YILDIZ  
Muhammet Ali ARSERİM  
Atilla Gencer DEVECİOĞLU  
Kadir TURAN  
Sedat BİNGÖL  
Mustafa AYHAN  
Gültekin AKTAŞ  
Mehmet Salih KESKİN  
Nizamettin HAMİDİ  
Fevzi ÖNEN  
Mehmet Emin ÖNCÜ

**Tasarım-Dizgi / Designing-Editing**  
Mesut ŞEKER

**Yazışma Adresi**

Mühendislik Dergisi, Koordinatörlük ve Yayın Bürosu,  
Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 21280 Diyarbakır  
Telefon : +90-412 248 82 17, Faks : +90-412-248 82 18  
Elektronik posta : [muhendislikdergisi@dicle.edu.tr](mailto:muhendislikdergisi@dicle.edu.tr)  
web : <http://dergipark.gov.tr/dumf>

Dergide yayınlanan yazılar izinsiz başka bir yerde yayınlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz.

ISSN Basılı Materyal: 1309 - 8640  
Online ISSN: 2146-4391

## Hakem Listesi / Reviewers List

Dergimize yayınlanmak üzere gönderilmiş olan makaleleri titiz bir şekilde değerlendiren kıymetli hakem hocalarımıza, değerli katkılarından dolayı teşekkür eder, katkılarının devamını dileriz.

*We greatly appreciate the contributions made by the scientists, who worked as reviewers for Dicle University Journal of Engineering (DUJE) and we expect their contributions to the following journal issues.*

- İbrahim KAYA (DU)  
Tayfun ABUT (Muş Alparslan Üniversitesi)  
Ali KARCI (İnönü Üniversitesi)  
Turgut Özseven (Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi)  
Nevin ÇELİK (Fırat Üniversitesi)  
Ömer Faruk CAN (DU)  
Mahmut Temel ÖZDEMİR (Fırat Üniversitesi)  
Fatih NUROĞLU (KTU)  
Yasin SÖNMEZ (Batman Üniversitesi)  
Cengiz COŞKUN (DU)  
İbrahim TÜRKOĞLU (Fırat Üniversitesi)  
Ayhan İSTANBULLU (Balıkesir Üniversitesi)  
Ahmet ALKAN (Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi)  
Murat ÇOLAK (Bayburt Üniversitesi)  
Mustafa GÜLEŞEN (Dumlupınar Üniversitesi)  
Mustafa TÜRKMEN (Kocaeli Üniversitesi)  
Uğur ÇALIGÜLÜ (Fırat Üniversitesi)  
Ali Ruhşen ÇETE (Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi)  
Levent Urtekin (Ahi Evran Üniversitesi)  
Uğur ÇAVDAR (İzmir Demokrasi Üniversitesi)  
Ahmet YARDIMEDEN (DU)  
Erol KILIÇKAP (DU)  
Meral ÖZER (Fırat Üniversitesi)  
Cengiz YILDIZ (Fırat Üniversitesi)  
Orhan ARPA (DU)  
Atilla Gencer DEVECİOĞLU (DU)  
Haluk KEJANLI (DU)  
Harun YAKA (Amasya Üniversitesi)  
Uğur Köklü (Karamanoğlu MehmetBey Üniversitesi)  
Kadir GÖK (İzmir Bakırçay Üniversitesi)  
Erkan BAHÇE (İnönü Üniversitesi)  
Pınar Demircioğlu (Aydın Adnan Menderes Üniversitesi)  
Kadir TURAN (DU)  
Rasim BEHÇET (İnönü Üniversitesi)  
Mehmet Özgün KORUKÇU (Uludağ Üniversitesi)

Muhammet DEVECİ (Deniz Harp Okulu)  
Baki BAĞRIAÇIK (Çukurova Üniversitesi)  
Ahmet TEYMEN (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)  
Demet DEMİR ŞAHİN (Gümüşhane Üniversitesi)  
Ali YILMAZ (KTU)  
Ahmet Emin KURTOĞLU (İstanbul Rumeli Üniversitesi)  
Ali ATAHAN (ITU)  
Mehmet Emin ÖNCÜ (DU)  
Aydın BÜYÜKSARAÇ (Bitlis Eren Üniversitesi)  
Fatih ÜNEŞ (İskenderun Teknik Üniversitesi)  
Mustafa DEMİRCİ (İskenderun Teknik Üniversitesi)  
Mehmet YILMAZ (Fırat Üniversitesi)  
Tacettin GEÇKİL (İnönü Üniversitesi)  
Tamer BAĞATUR (DU)  
Ayhan Bekleyen (DU)  
Nurtekin ÖZEN (Fırat Üniversitesi)  
İlhan Burak DURAN (İstanbul Kültür Üniversitesi)  
Altuğ SAYGILI (Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi)  
Onur ONAT (Munzur Üniversitesi)  
Mehmet KARATAŞ (Fırat Üniversitesi)  
Abdülhalim KARAŞİN (DU)  
Ayhan NUHOĞLU (Ege Üniversitesi)  
Arife AKIN (Konya Teknik Üniversitesi)  
Mahsum AYDIN (Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi)  
Muhammet Çağatay Karabörk (Dumlupınar Üniversitesi)  
Gökhan Altıntaş (Celal Bayar Üniversitesi)  
Onur Behzat TOKDEMİR (ODTU)  
Zülfü ULUCAN (Fırat Üniversitesi)

# İçindekiler / *Table of Contents*

## Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

Değişken parametrelili bir akıllı giriş için düşük dereceli $H_{\infty}$ kontrolcü tasarımı (Araştırma Makalesi) <i>Low order <math>H_{\infty}</math> controller design for a smart beam with parameter varying</i> (Research Article) <b>Cem ONAT, Melin ŞAHİN</b>	<b>457</b>
Meta-Genomik Gen Analizi için Filtre Tasarımı (Araştırma Makalesi) <i>Filter design (for error correction) in meta-genomic gene analysis</i> (Research Article) <b>İbrahim SAVRAN, Esra ERDEN</b>	<b>471</b>
Dairesel kesitli türbülans üreticilerinin ısı performansının araştırılması (Araştırma Makalesi) <i>Investigation of the thermal performance of circular cross-sectional turbulence generators</i> (Research Article) <b>Emre TURGUT</b>	<b>481</b>
Stability analysis of medium sized power plants subjected to grid events (Research Article) <b>Levent KILIÇ, Ayşe BASA ARSOY</b>	<b>491</b>
Android İşletim Sisteminde Kötücül Yazılım Tespit Sistemleri (Derleme Makalesi) <i>Malware Detection Systems in Android Operating System</i> (Review Article) <b>Abdullah DAĞLIOĞLU, İbrahim Alper DOĞRU</b>	<b>499</b>
Göğüs Verileri Metrikleri Üzerinden Kanser Sınıflandırılması (Araştırma Makalesi) <i>Cancer Classification by Breast Data Metrics</i> (Research Article) <b>Emine CENGİL, Ahmet ÇINAR</b>	<b>513</b>
İnternet üzerinden kontrol edilen tam otomasyonlu akıllı ev sistemleri için örnek bir uygulama (Araştırma Makalesi) <i>An example application for fully automated smart home systems controlled over</i> (Research Article) <b>Özen SİNE, Yücel KOÇYİĞİT</b>	<b>521</b>
Kablosuz Algılayıcı Ağlarında Heterojen Hibrid Kümeleme Modeli (Araştırma Makalesi) <i>Heterogeneous Hybrid Clustering Model in Wireless Sensor Networks</i> (Research Article) <b>Sercan YALÇIN, Ebubekir ERDEM</b>	<b>533</b>

## Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

- Çok duvarlı karbon nanotüp katkılı poliamit 6 polimerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi (Araştırma Makalesi)  
*Investigation of the mechanical properties of multi walled carbon nanotube filled polyamide 6 polymers (Research Article)*  
**Gözde KUŞ, Murat KOYUNBAKAN, Salih Hakan YETGİN, Ferhat YILDIRIM, Volkan ESKİZEYBEK, Abdurrahman GENÇ** **543**
- WC-Ni sert dolgu alaşımının kuru ve NaCl çözelti ortamlarındaki aşınma performansı (Araştırma Makalesi)  
*Wear performance of WC-Ni hardfacing coating in dry medium and NaCl solution (Research Article)*  
**Nilay ÇÖMEZ** **553**
- Çift elips yapısı etrafında çözüm uyarlamalı Navier-Stokes çözücüsü kullanarak yüksek Reynolds sayılı akış analizi (Araştırma Makalesi)  
*Analysis of high Reynolds number flow around a double ellipsoid configuration using solution adapted Navier-Stokes solver (Research Article)*  
**Emre KARA, Ahmet İhsan KUTLAR, Mehmet Haluk AKSEL** **563**
- Kireç Oranındaki Değişimin Erozyon Korozyonuna etkisinin Sonlu Elemanlar Analizi İle Araştırılması (Araştırma Makalesi)  
*Investigation of lime effect with Finite Element Analysis in Erosion Corosion (Research Article)*  
**Deniz ADA, Kadir GÖK** **575**
- Frezeleme işleminde silici uç kullanımının incelenmesi (Araştırma Makalesi)  
*Investigation of Using Wiper Inserts in the Milling Process (Research Article)*  
**Murat KIYAK** **585**
- Güneş enerjili bir kurutucudaki ekserjetik faktörlerin hesaplanması ve yapay sinir ağı ile modellenmesi (Araştırma Makalesi)  
*Calculation of some exergetic indicators in a solar dryer and modeling with artificial neural network (Research Article)*  
**Mehmet DAŞ, Ebru KAVAK AKPINAR** **593**
- Zeminle temas eden yapı kabuğunun ısı yalıtım kalınlığı için bir model önerisi (Araştırma Makalesi)  
*A model proposal for the thermal insulation thickness of the building envelope that contacts the ground (Research Article)*  
**İsmail Ağa GÖNÜL, Hatice ÇİÇEK** **611**
- Sürdürülebilirlik Kavramı ve Ekserji Analizi: Binaların Isıtma Sistemlerine Yönelik Bir Uygulama (Araştırma Makalesi)  
*Sustainability Concept and Exergy Analysis: An Application for Building Heating Systems (Research Article)*  
**Cem Tahsin YÜCER, Hüseyin KUDAK** **623**

- Investigation of wear behavior of Ti-6Al-4V and AISI 316 L biomaterials with ball on disc test device (*Research Article*)  
**Harun AKKUŞ, Tahsin KAMIŞ, Hayrettin DÜZCÜKOĞLU** **635**
- Toz Üretim Süreçlerinin Yağlamalı Yataklar Üzerine Etkisi (*Araştırma Makalesi*)  
*Effect of Powder Production Processes on Lubricated Bearings (Research Article)*  
**Levent URTEKİN, Rahmi ÜNAL, Özer AYDIN** **647**
- Sol-Jel Yöntemiyle TiO<sub>2</sub> ve HAP Kaplanan Ti6Al7Nb Alaşımının Mikroyapı ve Aşınma Davranışı (*Araştırma Makalesi*)  
*Microstructure and Wear Behavior of TiO<sub>2</sub> and HAP Coated Ti6Al7Nb Alloy by Sol-Gel Method (Research Article)*  
**Nihat TOSUN, Saleh Zakar KURMİ, Gül TOSUN** **653**
- Alüminyum Alaşımlı Otomobil Jantlarında Deneysel Darbe Testlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrulanması (*Araştırma Makalesi*)  
*Validation of Experimental Impact Tests on Aluminum Alloy Car Wheels using the Finite Element Method (Research Article)*  
**Emrah AYRAN, Mahmut PEKEDİS** **663**
- Bitlis İlinin Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin İstatistiksel Analizi (*Araştırma Makalesi*)  
*Statistical Analysis of The Wind Energy Potential of Bitlis Province (Research Article)*  
**Faruk ORAL** **671**
- Humanitarian Logistics Management After A Disaster: An Earthquake Case  
(*Research Article*)  
**Elifcan GÖÇMEN, Yusuf KUVVETLİ** **679**

## **Maden Mühendisliği / Mining Engineering**

- Artık malzemelerden Box Behnken test dizaynı kullanılarak hafif geopolimer beton üretimi (*Araştırma Makalesi*)  
*Production of lightweight geopolimer concrete from waste materials using Box Behnken test design (Research Article)*  
**Soner TOP, Hüseyin VAPUR** **689**
- Yüksek Fırın Cürufu İkamesinin Çimentolu Macun Dolgunun Dayanım Özelliklerine Etkisi (*Araştırma Makalesi*)  
*Effect of Substitution of Blast Furnace Slag on Strength Properties of Cemented Paste Backfill (Research Article)*  
**Hasan EKER, Ataç BAŞÇETİN, Serkan TÜYLÜ, Deniz ADIGÜZEL** **701**

## İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

- Ulusal, Bölgesel ve Uluslararası Bazda Yüksek Hızlı Demiryollarının Gelişimi, Mevcut Durumu ve Yatırım Planlarına Dair Bir Derleme (*Derleme Makalesi*)  
*Comparative Evaluation of Development, Existing Case and Investment Plans on High Speed Railways in National, Regional and International Scale (Review Article)*  
**Mehmet Fatih ALTAN, Mehmet Çağrı KIZILTAŞ** **715**
- Pomzadan imal edilmiş çelik lif katkılı bimsblokların mekanik özelliklerinin araştırılması (Araştırma Makalesi)  
*Investigation of mechanical properties of steel fiber reinforced bimsblock materials produced from pumice (Research Article)*  
**Yaşar KAYAN, Abdulhalim KARAŞİN, Ercan IŞIK** **723**
- Filtre malzemesi için çok türlü taşımacılık rotalarının performans indeksi ile vaka analizi: Hatay-Trabzon (Araştırma Makalesi)  
*Case study with the performance index of multimodal transport routes for the filter material: Hatay-Trabzon (Research Article)*  
**Ömer Faruk CANSIZ, Kevser ÜNSALAN** **731**
- Farklı Katkılarla Hazırlanan Asfalt Karışımların Sünme Performanslarının İncelenmesi (Araştırma Makalesi)  
*Investigation of creep performance of asphalt mixtures prepared with different additives (Research Article)*  
**Taner ALATAŞ, Akın İSTEK** **745**
- İklim değişikliğinde etkenler ile sonuçların birbirini tetiklemesi (Araştırma Makalesi)  
*Factors and consequences of climate change trigger each other (Research Article)*  
**Murat BATAN, Z. Fuat TOPRAK** **759**
- Optimum taşıt sayısının belirlenmesinde yapay sinir ağları ile çok değişkenli lineer regresyon tekniklerinin karşılaştırılması (Araştırma Makalesi)  
*Comparison of artificial neural networks and multi-variable linear regression techniques in determination of the number of optimum vehicles (Research Article)*  
**Ömer Faruk CANSIZ, Nazmi ÖZTEKİN, İbrahim ERGİNER** **771**
- Eğitim Binalarının Aydınlatma Performansı Açısından Değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)  
*Evaluation of Educational Buildings with Respect to Lighting Performance (Research Article)*  
**İrem BAYRAM, Özge AKBOĞA KALE, Selim BARADAN** **783**
- Radye Temel Oturma Hesabı için Yeni bir Yöntem (Araştırma Makalesi)  
*New method for estimating Raft Foundation Settlement (Research Article)*  
**Murat HAMDERİ** **799**
- Yük Taşımacılığında Tek Türlü ve Çok Türlü Taşımacılık Rotalarının Karbon Ayak İzinin Karşılaştırılması (Araştırma Makalesi)  
*Comparison of Carbon Footprint of Unimodal and Multimodal Transport Routes in Freight Transport (Research Article)*  
**Ömer Faruk CANSIZ, Kevser ÜNSALAN** **809**



Barit Tozu Modifiyeli Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik Özellikleri (Araştırma Makalesi) <i>Mechanical Properties of Self-Compacting Mortars Modified with Barite Powder</i> (Research Article) <b>Selim CEMALGİL</b>	<b>817</b>
Yapı-Zemin Etkileşiminin Tarihi Yiğma Minarelerin Deprem Davranışına Etkisi (Araştırma Makalesi) <i>The Effect of Soil-Structure Interaction on Earthquake Behavior of Historical Masonry Minarets</i> (Research Article) <b>Emin HÖKELEKLİ</b>	<b>825</b>
Trend Tespiti Yapılmış Akım Gözlem İstasyonlarında Güncel Durumun Belirlenmesi (Araştırma Makalesi) <i>Determination of Current Situation at Trend Observed Flow Observation Stations</i> (Research Article) <b>Nadire ÜÇLER</b>	<b>839</b>
Orta Karadeniz ve Doğu Karadeniz Bölgesinde kuraklık indisleri üzerine trend analizi uygulanması (Araştırma Makalesi) <i>Applying trend analysis on drought indices in the Central Black Sea and Eastern Black Sea Region</i> (Research Article) <b>Turgay PARTAL, Ercan YAVUZ</b>	<b>851</b>
İçinden Akışkan Geçen Boru Doğal Frekansının Genelleştirilmiş Regresyon Yapay Sinir Ağları Yöntemi İle Tahmini (Araştırma Makalesi) <i>Natural Frequency Estimation of Pipe Conveying Fluid by Using Generalized Regression Neural Networks</i> (Research Article) <b>Begüm Yurdanur DAĞLI, Abdulkerim ERGUT, Mustafa Erkan TURAN</b>	<b>863</b>
Towards Zero Waste in Construction: A Case Study Using Green Building Certification Systems (Research Article) <b>Duygu ERTAN</b>	<b>875</b>
Estimating Fluid Parameters of Submarine Outfall Using Neural Networks (Araştırma Makalesi) <b>Engin GÜCÜYEN, Recep Tuğrul ERDEM</b>	<b>889</b>

---

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (DÜMF) Mühendislik Dergisi yayınlarında varılan sonuçlar veya fikirlerin sorumluluğunu taşımamaktadır. Üniversite'nin, bu yayında ileri sürülen bilgi, alet, ürün veya işlevin doğruluğu, bütünlüğü, uygunluğu ve kullanılabilirliği konusunda bir yüklenimi ve iddiası bulunmamaktadır. Bu nedenle herhangi bir şekilde sorumlu tutulamaz.

Bu yayının herhangi bir kısmı, mühendislik dergisinin yazılı izni olmadıkça kaynak gösterilmeden yayınlanamaz, bilgi saklama sistemine alınamaz veya elektronik, mekanik, fotokopi, kayıt veya başka sistemlerle çoğaltılamaz.



## Değişken parametrelili bir akıllı kiriş için düşük dereceli $H_\infty$ kontrolcü tasarımı

**Cem ONAT\***

Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksek Okulu, Uçak Gövde-Motor Bölümü, Elazığ, Türkiye  
[conat@firat.edu.tr](mailto:conat@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0002-4295-4860 [Tel:042242370000-8986](tel:042242370000-8986)

**Melin ŞAHİN**

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye  
[msahin@metu.edu.tr](mailto:msahin@metu.edu.tr) ORCID: 0000-0002-0174-2490

Geliş: 14.09.2018, Revizyon: 28.01.2020, Kabul Tarihi: 10.03.2020

### Öz

*Bu çalışmada PZT (kurşun-zirkonyum-titanyum) yamalar ile donatılmış değişken parametrelili bir akıllı kirişin düzleme dik birinci eğilme titreşim biçimlerini basturmak için düşük derecelili bir  $H_\infty$  kontrolcü tasarlanmış ve uygulanmıştır. Kontrolcü tasarımı birbirini izleyen üç farklı adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda, serbest ucuna bir servo motor aracılığıyla dönebilecek şekilde bir kütle eklenmiş kirişin değişken parametrelili modeli deneysel olarak elde edilmiştir. İkinci adımda değişken parametrelili modeli tüm durumlarda içine alan sarsımlanmış (pertürbe edilmiş) model elde edilmiştir. Son adımda ise sarsımlanmış model üzerinden  $H_\infty$  kontrolcü hesaplanmıştır. Elde edilen kontrolcü hem benzetimsel hem de deneysel olarak uygulanmıştır. Sistemdeki parametre değişimlerine karşılık önerilen kontrolcünün kiriş titreşimlerini çok iyi bir şekilde bastırabildiği ve böylece gürbüz (robust) bir performans sergilediği ortaya konmuştur.*

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı kiriş; Titreşim; Robust kontrol;  $H_\infty$  kontrolcü; Parametre belirsizliği

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Hafiflik ve dayanıklılığın hedeflendiği tüm yapılarda titreşimlerin araştırılması ve kontrolü son derece önemli ve güncel bir konudur. Son yıllardaki algılayıcı ve uyarıcı teknolojilerindeki dikkate değer gelişmeler, esnek mekanik sistemlerin aktif titreşim kontrolü problemlerinde akıllı yapıların kullanımını arttırmaktadır. Aktif titreşim kontrolünde piezo-elektrik malzemeler hem uyarıcı hem de algılayıcı olarak çalışabilirler. Bu alanda piezo-elektrik malzemelerin çoğunlukla kullanılan tipi PZT (Lead-Zirconate-Titanate, kurşun-zirkonyum-titanyum) piezo-seramiklerdir. Piezo-seramikler esnek mekanik sistemlerin üzerine yapıştırılarak akıllı yapılar elde edilmektedir.

Akıllı kirişlerin aktif titreşim kontrolü için kontrolcü tasarımı konusunda yapılmış çalışmalar, geleneksel, adaptif ve robust olmak üzere üç kategoride sınıflandırılabilir [Ros vd, 2015]. PID ve PD gibi geleneksel kontrolcü uygulamaları literatürde en sık rastlanan çalışma gruplarından (Saad vd, 2011; Kumar vd, 2014; Fei vd, 2010; Alam ve Rahman, 2010; Khot vd, 2012; Chhabra vd, 2012; Fadil vd, 2013). Basit yapıları, kolay anlaşılabilirlikleri ile ön planda olan geleneksel kontrolcüler, yüksek performans beklenmeyen yapılarda basit çözümler sunmaktadır. Ancak, yüksek performans beklentisi, sistem modelindeki belirsizlikler ve farklı çalışma şartları gibi ilave meydan okuyucu problemler geleneksel kontrolcülerini yetersiz kılmaktadır. Bu bakış açısıyla, adaptif kontrol algoritmaları daha uygun çözümler sunabilmektedir (Fadil ve Darus, 2013; Saad vd, 2012; Zoric vd, 2014; Shouwei vd, 2010). Ancak adaptif kontrol mimarilerinin, ayarlanabilir kontrolcü yapısına ek olarak bir adaptasyon şemasına da ihtiyaç duyması kontrolcü yapısını oldukça karmaşık hale getirmektedir. Buna ek olarak, uygulamadaki çalışma koşullarında oluşacak herhangi bir değişimin sistemde bir değişime yol açması ve bu yeni duruma kontrolcünün adapte olması söz konusu geçişlerde önemli performans kayıplarına sebep olmaktadır. Sistemdeki parametre ve modelleme belirsizliklerine karşın performans kaybı

olmaksızın tek bir LTI kontrolcü ile kiriş titreşimlerinin kontrolü düşüncesi için robust kontrol metotları ile tasarlanmış kontrolcüler kullanılmalıdır. Robust kontrol, sistemin dış girişlerine ek olarak, sistem modelindeki gerek doğrusalsızlıkların ve gerekse parametre belirsizliklerinin varlığında performans ile kararlılık arasında ödünleşmeye odaklanır (Onat vd, 2006; Onat vd, 2007; Onat vd, 2009; Onat, 2014). Oveisi ve Nesttorovic karma  $H_2/H_\infty$  yaklaşımı önererek tasarımlarının etkinliğini deneysel olarak göstermişlerdir (Oveisi ve Nesttorovic, 2014). Deneysel düzeneklerinde titreşimi ölçmek için lazer titreşim ölçer kullanmışlardır. Sistem modeli sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş olup, tasarladıkları kontrolcü ile birinci mod titreşimlerini yaklaşık 20 dB baskılamayı başarmışlardır. Sridevi ve Madhavasarma bir  $H_\infty$  kontrolcü tasarlayıp LQG (Linear Quadratic Gaussian) kontrolcü ile karşılaştırmışlardır (Sridevi ve Madhavasarma, 2010). Kullanılan deneysel sistemde kiriş titreşimlerini PZT yamalar ile ölçmüşlerdir. Akıllı kirişin modelini deneysel olarak elde etmelerine karşın kontrol uygulamalarını benzetimsel olarak vermişlerdir. Elde ettikleri kapalı çevrim frekans cevaplarında kontrolcünün yüksek frekanslarda çok etkin olduğu görülmektedir. Bu durumun tasarladıkları kontrolcülerin pratik uygulamadan uzak kalacağı anlamına geldiği şeklinde değerlendirilmektedir. Söz konusu çalışmanın benzetimsel sonuçlarına göre  $H_\infty$  kontrolcünün LQG kontrolcüyü göre çok daha iyi bir performans sergilediği gösterilmiştir. Akıllı kirişlerde titreşimlerin robust kontrolü konusunda son zamanların yenilikçi kontrolcüsü Omid ve Mahmoodi tarafından tasarlanmış ve uygulanmıştır (Omid ve Mahmoodi, 2014). Söz konusu çalışmada,  $H_\infty$ MPPF ( $H_\infty$  modified positive position feedback) ve  $H_\infty$ MPVF ( $H_\infty$  modified positive velocity feedback) tasarlanmıştır. PZT yamaların sadece eyleyici olarak kullanıldığı çalışmada  $H_\infty$ MPVF kontrolcüsü  $H_\infty$ MPPF'e göre çok üstün bir performans sergilemiştir. Bu tip kontrolcülerin etkileyici performansları,  $H_\infty$  kontrolcünün yanı sıra kullanılan paralel bir kompensatör sayesinde. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü

bünyesinde de teorik ve deneysel olarak, yapıların aktif titreşim kontrolüne yönelik çeşitli çalışmalar [Arıdoğan, 2010; Şahin vd, 2008] yapılmıştır. PZT yamaların uyarıcı ve algılayıcı olarak kullanıldığı denetçi uygulamalarında, akıllı kirişin titreşimlerinin aktif kontrolünde etkin bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir. Akıllı kiriş üzerinde aktif titreşim sönümlemesine yönelik birçok denetçi tasarımı da yapılmıştır. Performansları incelenmiş olan denetçiler arasında  $H_\infty$  (Yaman vd, 2003), PID (Onat vd, 2010; Turan vd, 2019; Kumar vd, 2014), LQR (Onat vd, 2013), LQG (Onat vd, 2011), CFE (Onat vd, 2011; Onat vd, 2012) ve LPV (Onat vd, 2011) sayılabilir.

Yukarıda anılan çalışmalarda kullanılan konsol kiriş (*cantilever beam*) modeli sabit kütle ve direngenlik özelliklerine sahip olduğu için, sistemin fiziki parametrelerinde oluşabilecek değişimleri temsil etmede yetersiz kalabilir. Örneğin yakıt kullanıldıkça uçak kanadının doğal frekansları ve titreşim biçimleri değişir. Sistemin fiziksel özelliklerindeki değişimi deneysel modele yansıtma ve daha geniş bir gerçek durumu modelleyebilmek amacıyla, akıllı konsol kirişin serbest ucuna bir servo motor aracılığıyla pozisyonu değiştirilebilir şekilde fazladan bir kütle eklenmiştir (Akın ve Şahin, 2015). Buna göre, servo motorun 5 farklı açıda kütle tutmasıyla birlikte sistem modeli öngörülü biçimde değiştirilebilmektedir. Bunun yanında söz konusu (Akın ve Şahin, 2015) çalışmada, öncelikle değerlendirilen LQR kontrolcünün tüm durumlar için yetersiz kalabileceği düşünülüp, yapay sinir ağı kontrol algoritması kullanılarak gürbüzlük sağlanmıştır.

Bu çalışmada daha karmaşık bir yaklaşım olan yapay sinir ağları yerine çok daha basit bir şekilde programlanıp uygulanabilen lineer zamanla değişmeyen (*Linear Time Invariant; LTI*), düşük dereceli bir  $H_\infty$  kontrolcü tasarlanmış, bunun için de deneysel modele uygulanabilecek en basit model olan ikinci dereceden bir analitik model uyarlanmıştır. Çünkü rezonans ve anti-rezonans frekanslarına sahip gerçek bir sistem en az ikinci dereceden bir transfer fonksiyonu ile tanımlanabilmektedir. Söz konusu transfer fonksiyonları elde edildikten

sonra, 5 farklı deneysel modeli içine alan sarsılmış (pertürbe edilmiş) ikinci dereceden bir model türetilmiş ve bu model üzerinden  $H_\infty$  kontrolcü tasarlanmıştır. Böylece, MATLAB programı kullanılarak, piezo-elektrik algılayıcı ve uyarıcı içeren değişken parametrelili konsol bir kirişin titreşimlerinin kontrolü için gürbüz bir benzeşimsel tasarım yöntemi sunulmuştur.

Bu kapsamda önerilen kontrolcü tasarımı literatürde bulunan diğer  $H_\infty$  kontrolcü tasarımlarına göre aşağıda belirtilen hususlarda yenilik getirmekte/üstünlük sağlamaktadır:

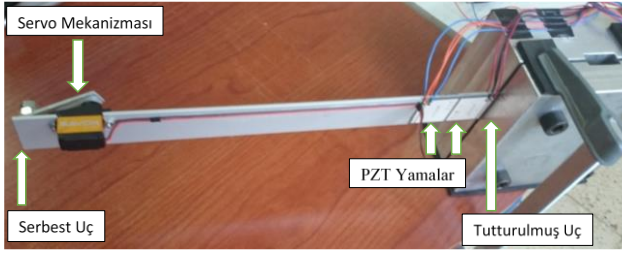
- Kontrolcü tasarımı parametre değişimli akıllı bir kirişin deneysel modelleri baz alınarak yapılmıştır.
- Düşük dereceden bir kontrolcü tasarlamak için olası en basit yaklaşım olan 2. dereceden bir sistem modeli kullanılmıştır.
- Sentezlenen kontrolcünün uygulanması için herhangi bir indirgeme işlemi yapılmamıştır.
- Tasarlanan kontrolcünün performansını artırmaya yönelik herhangi bir ilave kompensatör kullanılmamıştır.
- Kontrolcü tasarımını güçleştiren anti rezonans frekansını kontrolcü tasarım probleminden düşüren kolay anlaşılır benzeşimsel bir tasarım yöntemi sunulmuştur.

Beş farklı durum için frekans ve zaman tanım kümesinde yapılan deneysel çalışmalar, tasarlanan  $H_\infty$  kontrolcünün tüm durumlarda etkin bir performans sergileyerek sistemdeki fiziksel değişimlerin etkilerini kontrol edebildiğini ortaya koymaktadır.

### Parametre Belirsiz Akıllı Kiriş Modeli

Şekil 1 de verilen akıllı kiriş bir ucu tutturulmuş, diğer ucu serbest olan 350x30x2 mm boyutlarında alüminyum malzemeden oluşmaktadır (Akın ve Şahin, 2015). Üzerine 25.37x25.37x0.50 mm boyutlarında BMP500 tipi PZT yama simetrik olarak ikisi bir yüzeyde, ikisi diğer yüzeyde olmak üzere 4 adet yapıştırılmıştır. Bu piezoelektrik yamalar kullanım amaçlarına göre kontrol amaçlı piezoelektrik yamalar, algılayıcı yama ve uyarıcı

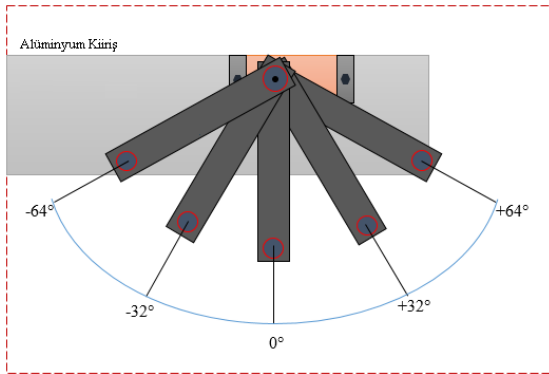
yama olarak tanımlanmıştır. Detaylı bilgi (Akın ve Şahin, 2015) ve (Akın, 2015) bulunabilir.



Şekil 1: Akıllı Kiriş (Akın ve Şahin, 2015)

Akıllı kirişin uç kısmında ağırlık değişiminin frekans cevaplarına etkisini görmek amacıyla kurulmuş bir servo mekanizması bulunmaktadır. Bu çalışmada servo kolundaki ağırlık 5 farklı konumda değerlendirilmiştir.

Sistemin fiziksel parametrelerindeki değişim, kirişin ucuna eklenmiş servo mekanizmanın, servo kolunun 5 farklı açıda konumlandırılması ile deneysel modele yansıtılmaktadır. Şekil 2'de gösterildiği gibi, servo kol açıları  $+64^\circ$ ,  $+32^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-32^\circ$  ve  $-64^\circ$  olacak şekilde 5 farklı durum göz önüne alınmıştır. Buna göre birinci durumda servo kol açısı  $+64^\circ$ , ikinci durumda  $+32^\circ$ , üçüncü durumda  $0^\circ$ , dördüncü durumda  $-32^\circ$  ve beşinci durumda  $-64^\circ$  dir.



Şekil 2: Servo Mekanizma Kolunun pozisyonuna Göre Deneysel Sistem Durumları (Akın ve Şahin, 2015)

Her bir durum için, kontrol amaçlı piezoelektrik yamalara 5 Hz – 30 Hz frekans aralığında üssel artan sinüs dalgaları uygulanmış ve algılayıcı olarak kullanılan piezoelektrik yama yardımıyla

sistemin cevabı ölçülmüştür. Bu giriş-çıkış verileri, MATLAB programı yardımıyla hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak frekans cevap fonksiyonuna çevrilmiştir. Böylece elde edilen 5 farklı deneysel veriye uydurulan 2. Dereceden transfer fonksiyonları Denklemler (1-5)'de verilmektedir. Denklem (1) durum 1 için elde edilmiş transfer fonksiyonunu diğer denklemler ise aynı sırayla karşılık geldikleri durumlar için elde edilmiş transfer fonksiyonlarını göstermektedir.

$$G_1(s) = \frac{0.0182s^2 + 0.3710s + 251.1245}{s^2 + 1.5255s + 7193.2} \quad (1)$$

$$G_2(s) = \frac{0.0176s^2 + 0.3923s + 264.4334}{s^2 + 1.5840s + 7604.7} \quad (2)$$

$$G_3(s) = \frac{0.0169s^2 + 0.4183s + 283.0299}{s^2 + 1.6754s + 8175.1} \quad (3)$$

$$G_4(s) = \frac{0.0162s^2 + 0.4459s + 303.3521}{s^2 + 1.7759s + 8796.6} \quad (4)$$

$$G_5(s) = \frac{0.0158s^2 + 0.4624s + 317.3042}{s^2 + 1.8454s + 9216.7} \quad (5)$$

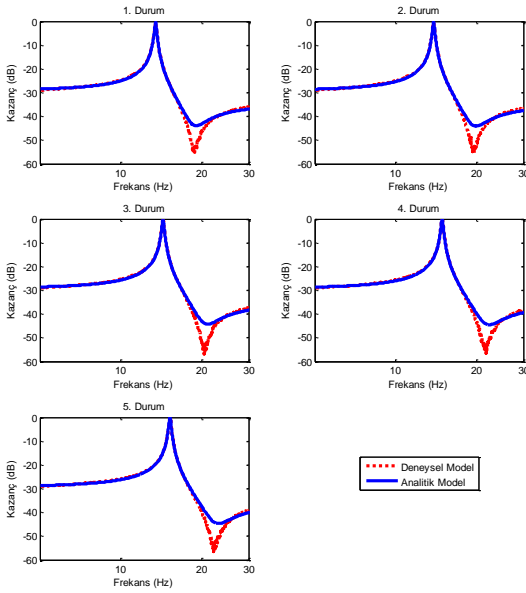
Şekil 3, akıllı kirişin 5 farklı durumuna ilişkin deneysel ve bunlara uydurulan analitik frekans cevap fonksiyonlarını göstermektedir. Buna göre uydurulan en basit yaklaşımlı ikinci dereceden transfer fonksiyonlarının dahi özellikle rezonans bölgesinde büyük bir uyum gösterdiği görülmektedir.

## H<sub>∞</sub> Kontrolcü Tasarımı

Gerçek bir sistemde, fiziksel parametreler tam olarak bilinmez. Ancak belirli yüzdesel aralıkta tahmin edilebilirler. Parametre belirsiz akıllı kiriş modeli tanımlanırken, ikinci dereceden elde edilen sistem transfer fonksiyonunun payda kısmındaki fiziksel terimler Denklem (6)'da verildiği gibi hesaba katılabilir. Buna göre, benzeşimsel olarak mekanik sistemin kütle değeri m, sönüm değeri c ve rijitlik katsayısı değeri k

$$\begin{aligned} m &= \bar{m}(1 + p_m \delta_m), \\ c &= \bar{c}(1 + p_c \delta_c), \\ k &= \bar{k}(1 + p_k \delta_k) \end{aligned} \quad (6)$$

yazılabilir. Denklem (3)'de verilen transfer fonksiyonu temel alındığında,  $\bar{m} = 1$ ,  $\bar{c} = 1.6754$  ve  $\bar{k} = 8175.1$  değerleri  $m$ ,  $c$  ve  $k$  fiziksel parametrelerinin nominal değerlerini ifade eder.  $p_m$ ,  $p_c$ ,  $p_k$  ve  $\delta_m$ ,  $\delta_c$ ,  $\delta_k$  ifadeleri ise bu fiziki parametrelerin muhtemel sarsımlarını (pertürbasyonlarını) tanımlamaktadırlar. Buna göre tasarım için referans alınan sistem karakteristik denklemi  $ms^2 + cs + k$  biçimindedir. Bu form, çok iyi bilindiği gibi, basit kütle-sönüm-yay sisteminin karakteristik denklemidir. Tasarımın bu aşamasında ihmal edilen anti-rezonans frekansını belirleyen giriş dinamiği (nominal transfer fonksiyonunun pay kısmı;  $0.0169s^2 + 0.4183s + 283.0299$ ) tasarımın son evresinde  $H_\infty$  kontrolcü elde edildikten sonra hesaba katılmaktadır.



Şekil 3: Akıllı Kirişin Beş Farklı Durumdaki Deneysel ve Analitik Modellerinin Frekans Cevapları

Bu çalışmada,  $p_m = 0.4$ ,  $p_c = 0.2$ ,  $p_k = 0.3$  ve  $-1 \leq \delta_m, \delta_c, \delta_k \leq 1$  olarak göz önüne alınmıştır. Bu değerlerle  $m$  parametresinde  $\pm\%40$ 'lık değişim,  $c$  parametresinde  $\pm\%20$ 'lik değişim ve  $k$  parametresinde  $\pm\%30$ 'luk değişim

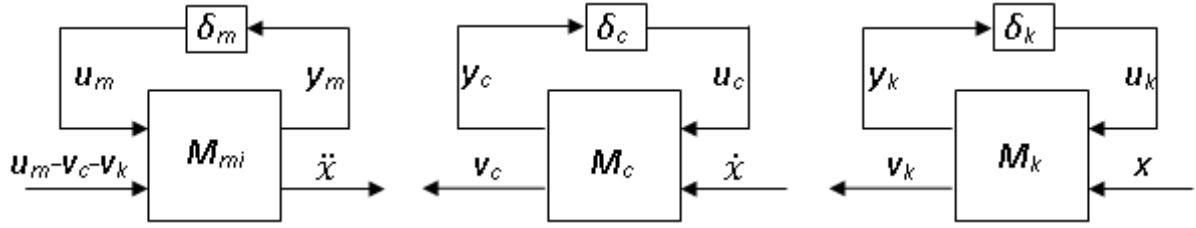
göz önüne alınmıştır. Parametrelerin belirsizlik oranları, servo kolun tüm pozisyonları için muhtemel transfer fonksiyonlarını kapsayacak sarsımlanmış modeli elde etme düşüncesi ile seçilmiştir. Sistemdeki parametre belirsizliklerini modelde hesaba katmanın etkili yollarından biri lineer kesirsel dönüşümler (*Linear Fractional Transforms; LFTs*) kullanmaktır. Söz konusu belirsiz değerler LFTs ile hesaba katılabilir (Gu vd. 2005, Onat vd. 2005). Sarsımlanmış bu üç fiziksel parametrenin üst (upper) lineer kesirsel dönüşüm ifadeleri ve buna ilişkin matris ifadeleri belirlenmiş ve Denklemler (7-9)'da verilmiştir (Gu vd. 2005).

$$\begin{aligned} \frac{1}{m} &= \frac{1}{\bar{m}(1 + p_m \delta_m)} = F_u(M_{mi}, \delta_m), \\ M_{mi} &= \begin{bmatrix} -p_m & \frac{1}{\bar{m}} \\ -p_m & \frac{1}{\bar{m}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

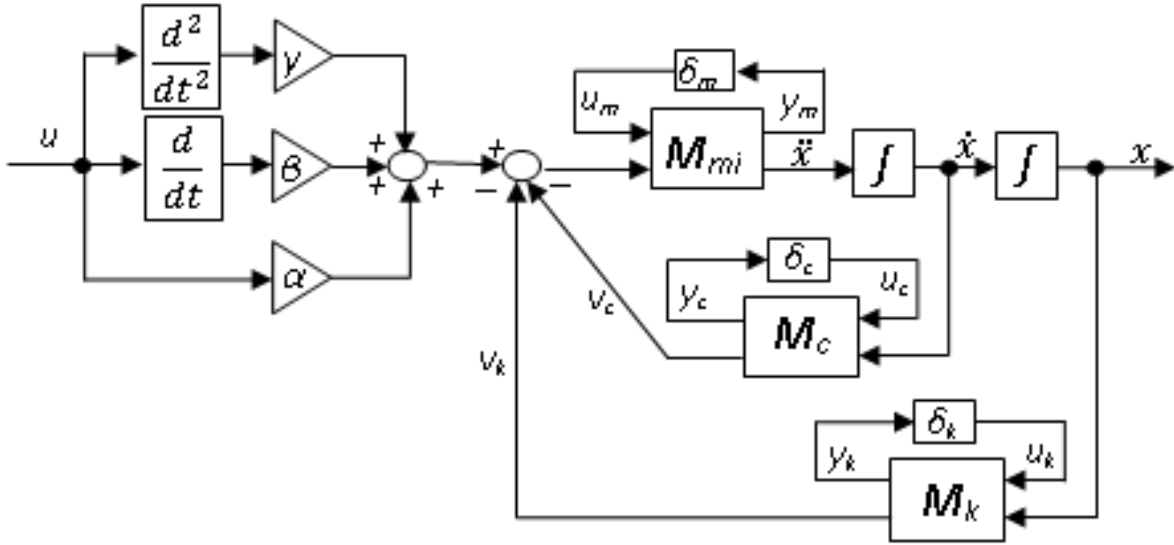
$$\begin{aligned} c &= \bar{c}(1 + p_c \delta_c) = F_u(M_c, \delta_c), \\ M_c &= \begin{bmatrix} 0 & \bar{c} \\ p_c & \bar{c} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} k &= \bar{k}(1 + p_k \delta_k) = F_u(M_k, \delta_k), \\ M_k &= \begin{bmatrix} 0 & \bar{k} \\ p_k & \bar{k} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

Bu LFT'ler Şekil 4'de gösterilmektedirler. Bu çerçevede belirsiz parametrelerin LFT'leri ile oluşturulmuş sistem blok diyagramı Şekil 5'de verilmektedir. Burada  $\delta_m, \delta_c$  ve  $\delta_k$  parametre sarsımlarını,  $y_m, y_c, y_k$  ve  $u_m, u_c, u_k$  sarsım bloklarının giriş ve çıkışlarını simgelemektedir. Burada,  $x_1 = x$ ,  $x_2 = \dot{x} = \dot{x}_1$ ,  $y = x_1$  ve  $\dot{x}_2 = \ddot{x} = \dot{x}_1$  tanımlamaları altında Denklem (10)'da verilen denklem seti yazılır.



Şekil 4: LFT'lerle Belirsiz Parametrelerin Gösterimi



Şekil 5: Belirsiz Parametrelili Sistemin Blok Diyagramı

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= -p_m u_m + \frac{1}{m}(u - v_c - v_k) \\
 y_m &= -p_m u_m + \frac{1}{m}(u - v_c - v_k) \\
 y_c &= \bar{c} x_2 \\
 y_k &= \bar{k} x_1 \\
 v_c &= p_c u_c + \bar{c} x_2 \\
 v_k &= p_k u_k + \bar{k} x_1 \\
 y &= x_1 \\
 u_m &= \delta_m y_m \\
 u_c &= \delta_c y_c \\
 u_k &= \delta_k y_k
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

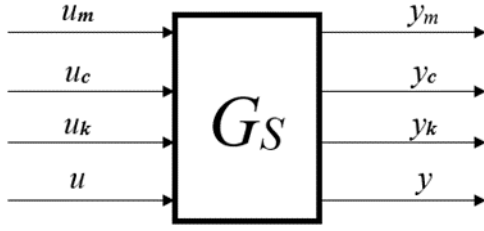
sarsımlanmış modelin durum-değişkeni uzayı modeli Denklem (11)'deki gibi elde edilir (Gu vd. 2005).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ y_m \\ y_c \\ y_k \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\bar{k} & -\bar{c} & -p_m & -\frac{p_c}{m} & -\frac{p_k}{m} & \frac{1}{m} \\ -\bar{k} & -\bar{c} & -p_m & -\frac{p_c}{m} & -\frac{p_k}{m} & \frac{1}{m} \\ 0 & \bar{c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_m \\ y_c \\ y_k \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_m \\ u_c \\ u_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_m & 0 & 0 \\ 0 & \delta_c & 0 \\ 0 & 0 & \delta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_m \\ y_c \\ y_k \end{bmatrix}
 \tag{11}$$

Denklem (10)'da verilen ifadeler durum-değişkeni uzayı formatında bir araya getirilerek,

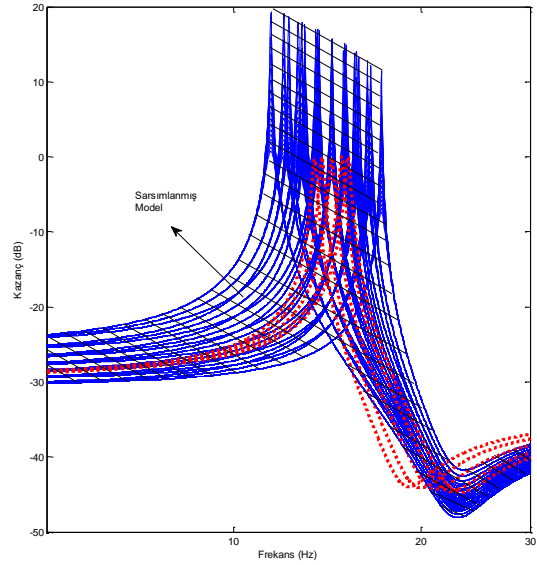
Belirsiz parametreler hesaba katılarak oluşturulan sarsımlanmış modelin giriş-çıkış ilişkisi Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6: Sarsımlanmış Akıllı Kiriş Sisteminin Blok Diyagramı

Bu şekilde elde edilen parametre-belirsiz akıllı kiriş sisteminin açık çevrim frekans cevabı Şekil 7'de verilmektedir. Parametre-belirsiz sistemin sarsımlanmış modeli bilhassa rezonans bölgesinde akıllı kirişin beş farklı durumdaki modelini de içine almaktadır.

Tasarlanan kontrolcü tüm durumlarda sistemi kararlı kılmalı ve gerekli kapalı çevrim performansını sağlayabilmelidir. Bu çalışmada, kapalı çevrim için performans kriteri Denklem (12)'de tanımlanmaktadır. Burada K kontrolcüyü ifade etmek üzere,  $W_p$  ve  $W_u$  dış bozucu reddi ve gürbüz performans gereksinim frekans karakteristiklerini ortaya koymak için seçilen ağırlık fonksiyonlarıdır. Ayrıca  $S(G_S) = (I + G_S K)^{-1}$  ifadesi hassasiyet fonksiyonunu tanımlamaktadır. Aslında hassasiyet fonksiyonu referans izleme hatasının transfer fonksiyonudur. Söz konusu sonsuz normu eşitsizliğinin sağlanması, bozucu giriş etkisinin başarılı bir şekilde kabul edilebilir seviyeye çekildiği ve arzu edilen gürbüz performansa ulaşıldığı anlamına gelir.  $W_p$  ve  $W_u$  ağırlık fonksiyonları ile kurulan genelleştirilmiş kapalı çevrim sistem yapısı Şekil 8'de verilmektedir



Şekil 7: Sarsımlanmış Modelin Frekans Cevabı

Titreşim kontrolü problemleri regülatör problem olduğundan  $r$  referans girişi sıfır alınmaktadır. Bir başka ifade ile titreşim kontrolü problemi sistemin tüm durum değişkenlerini sıfıra götürülmesi problemi olarak algılanabilir. Şekil 8'de verilen genelleştirilmiş kontrol yapısında  $G$  sistemi  $G_s$  sisteminin üst LFT'sini ( $G = F_u(G_s, \Delta)$ ) ve  $K$  kontrolcüyü ifade etmektedir.

$$\left\| \begin{bmatrix} W_p S(G_s) \\ W_u K S(G_s) \end{bmatrix} \right\|_{\infty} < 1 \quad (12)$$

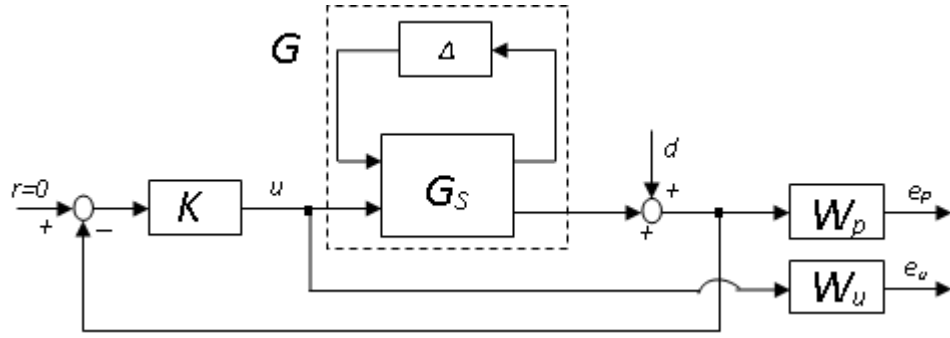
Bu çalışmada kullanılan  $W_p$  ve  $W_u$  ağırlık fonksiyonları sırasıyla Denklem (13-14)'de verilmektedir. Söz konusu ağırlık fonksiyonları Matlab bilgisayar programı ortamında oluşturulan döngülü simülasyon programı kullanılarak belirlenmiştir. Bunun için  $W_p$  ve  $W_u$  ağırlık fonksiyonlarının tüm parametreleri "for-end" döngülü özel bir yazılım ile her bir parametre setine karşılık gelen frekans cevapları üzerinden optimize edilmiştir.

$$W_p = \frac{15s^2 + 500s + 14 \cdot 10^4}{s^2 + 0.018s + 8172.2} \quad (13)$$

$$W_u = 1 \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

$d$  bozucu giriş olmak üzere genelleştirilmiş sistemin transfer fonksiyonu Denklem (15)'de olduğu gibi ifade edilebilir.





Şekil 8: Genelleştirilmiş Sistem Yapısı

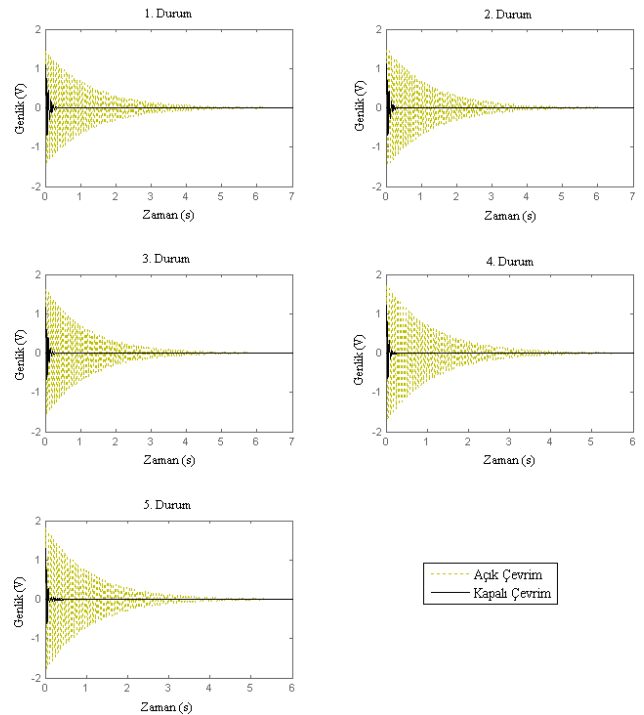
$$\begin{bmatrix} e_p \\ e_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_p(I + GK)^{-1} \\ W_uK(I + GK)^{-1} \end{bmatrix} d \quad (15)$$

Burada,  $d$ 'den  $e_p$  ve  $e_u$ 'ya olan transfer fonksiyonları sonsuz normunun belirsizlik transfer matrisi  $\Delta$ 'nın muhtemel bütün durumları için minimize edecek  $K$  kontrolcüsü MATLAB bilgisayar programı Robust Kontrol araç-kutusu kullanılarak hesaplanmıştır. Tasarlanan kontrolcünün durum değişkeni uzayı matrisleri, Denklem (16)'da verilmiştir.

### Benzetim Çalışmaları

Benzetim çalışmaları hem zaman hem de frekans tanım kümesinde yapılmıştır. Denklem (16)'da verilen  $H_\infty$  kontrolcü ile oluşturulan kapalı çevrim sistem çıkışı ile açık çevrim sistem çıkışı, karşılaştırma amacıyla birlikte sunulmuştur. Şekil 9'da beş farklı durum için zaman tanım kümesi cevapları verilmektedir. Buna göre, tüm durumlarda tasarlanan kontrolcü girişin düzlemde birinci eğilme titreşimlerini yaklaşık 0.3 s içinde bastırabilmiştir.

Şekil 10'da beş farklı durum için frekans tanım kümesindeki zorlanmış titreşim cevapları verilmektedir. Buna göre tüm durumlarda tasarlanan kontrolcü giriş titreşimlerini birinci rezonans civarında etkin bir şekilde ve tüm durumlarda en az 25 dB olarak baskılayabilmiştir.



Şekil 9: Akıllı Kirişin Zaman Tanım Kümesi Serbest Titreşim Benzetim Cevapları

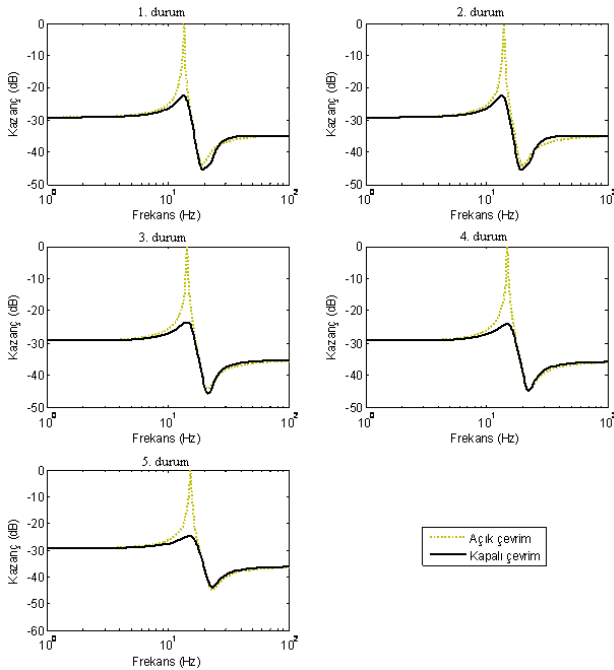
$$A_K = 1 \cdot 10^{10} \begin{bmatrix} -0.000000002475148 & -0.000001674733136 & -4.809061154112278 & -0.018544259476578 & -6.587275470464246 & 1.244577308228813 \\ 0.000000000100000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.000000000100000 & 0 & 0 \\ 0000000000000000.0 & 0.000000000000000 & -0.980472323016947 & -0.003780804242357 & -1.343013883737415 & 0.253744451986313 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.000000000156728 & -0.000000009039948 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.000000009039948 & -0.00000000005992 \end{bmatrix}$$

$$B_K = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -4.533132506415594 \\ 0.883361222858091 \end{bmatrix}$$

$$C_K = [0 \quad 59.171597633136102 \quad 00 \quad 0 \quad 0]$$

$$D_K = [0]$$

(16)



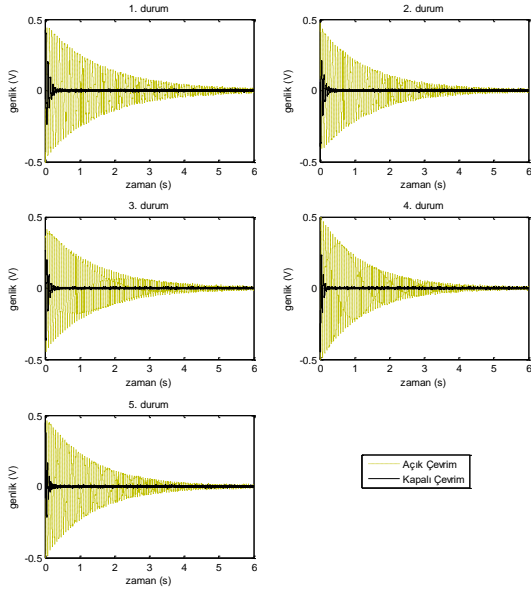
Şekil 10: Akıllı Kirişin Frekans Tanım Kümesi Zorlanmış Titreşim Benzetim Cevapları

## DeneySEL Çalışmalar

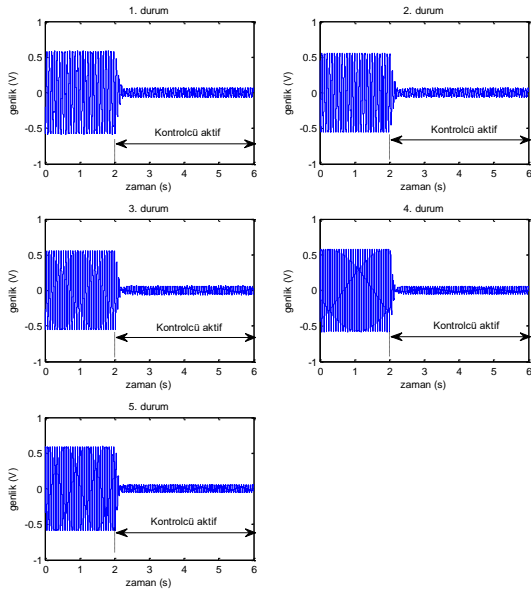
Tasarlanan kontrolcünün etkinliğini belirlemek için kirişin ucuna eklenen kütle için 5 farklı konumu için deneyler yapılmıştır. Bu durumlarda eklenmiş kütle için konumunu belirleyen servo kol açıları sırasıyla, birinci durumda +64°, ikinci durumda +32°, üçüncü durumda 0°, dördüncü durumda -32° ve beşinci durumda -64° pozisyonundadır. Şekil 11’de akıllı kirişin zaman tanım kümesi serbest titreşim deneysel cevapları Şekil 12’de ise zaman tanım

kümesi zorlanmış titreşim deneysel cevapları sunulmuştur. Servo kolun

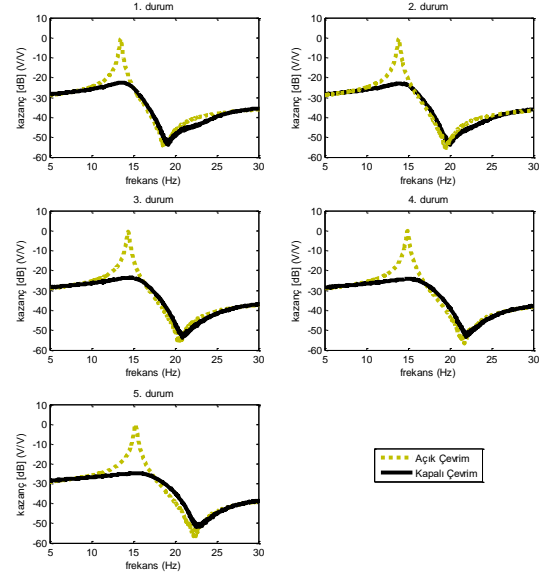
tüm durumlarında, önerilen kontrolcü güzel bir titreşim bastırma performansı ortaya koymuştur. Tüm durumlar için en fazla 0.25 saniyelik süre içinde giriş titreşimlerini bastırmaktadır. Bu bakımdan deneysel sonuçlar simülasyon sonuçları ile tam bir uyum içerisinde. Akıllı girişin frekans tanım kümesi zorlanmış titreşim deneysel cevapları ise açık çevrim ve kapalı çevrim durumları göz önünde tutularak Şekil 13’de verilmiştir. Buradan, önerilen kontrolcünün tüm durumlarda birinci rezonans bölgesini en az 25 dB baskıladığı görülmektedir.



Şekil 11: Akıllı Kirişin Zaman Tanım Kümesi Serbest Titreşim Deneysel Cevapları



Şekil 12: Akıllı Kirişin Zaman Tanım Kümesi Zorlanmış Titreşim Deneysel Cevapları



Şekil 13: Akıllı Kirişin Frekans Tanım Kümesi Zorlanmış Titreşim Deneysel Cevapları

## Sonuç

Bu çalışmada, fiziksel değişimli bir akıllı kirişin düzleme dik ilk eğilme titreşimlerinin kontrolü için bir  $H_\infty$  kontrol tasarım yöntemi önerilmiştir. Buna göre, kiriş modelinin karşılık geldiği basit titreşim sistemi benzeşiminden faydalanılarak kontrolcü tasarlanmıştır. Oluşturulan kontrolcünün benzetimsel ve deneysel sonuçları birlikte sunulmuştur. Sonuçlar önerilen kontrolcünün, göz önüne alınan tüm durumlarda sistem parametrelerindeki değişimlere karşılık gürbüz bir performans sergilediğini göstermiştir.

## Kaynaklar

- Akın O., (2015). Active Neuro-Adaptive Control of a Smart Beam Having Uncertainties in Structural Dynamics. Yüksek Lisans Tezi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, Ankara.
- Akın O., Şahin M., (2015). Akıllı Bir Kirişin Titreşimlerinin Doğrusal-Karesel Düzenleyici (LQR) İle Aktif Denetimi, XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, Trabzon, 24-28 Ağustos 2015.
- Alam M.N. and Rahman N.U., (2010). Active Vibration Control of a Piezoelectric Beam Using PID Controller: Experimental Study, Latin American Journal of Solids Structure, vol. 9, pp. 657– 673.
- Aridogan M. U., (2010). Performance Evaluation of Piezoelectric Sensor/Actuator on Investigation of

- Vibration Characteristics and Active Vibration Control of A Smart Beam. Master's thesis, Middle East Technical University.
- Chhabra D., Narwal K., and Singh P., (2012). Design and Analysis of Piezoelectric Smart Beam For Active Vibration Control, *International Journal of Advance Research and Technology*, vol. 1, pp. 1–5.
- Fadil M. A. and Darus I. Z. M., (2013). Evolutionary Algorithms For Self- Tuning Active Vibration Control of Flexible Beam, *Australian Control Conference*, pp. 104–108.
- Fadil M.A., Jalil N.A., and Darus I. Z.M., (2013). Intelligent PID Controller Using Iterative Learning Algorithm For Active Vibration Controller of Flexible Beam, *IEEE Symposium on Computer and Informatics*, pp. 80–85.
- Fei J., Fang Y., and Yan C., (2010). The Comparative Study of Vibration Control of Flexible Structure Using Smart Materials, *Mathematical Problems in Engineering*.
- Gu D. W., Petkov P. Hr. and Konstantinov M. M., (2005), *Robust Vontrol Design with Matlab*, Springer.
- Khot S., Yelve N.P., Tomar R., Desai S., and Vittal S., (2012). Active Vibration Control of Cantilever Beam By Using PID Based Output Feedback Controller, *Journal of Vibration and Control*, vol. 18, pp. 366–372.
- Kumar S.,Srivastava R., Srivastava R. K., (2014). Active Vibration Control of Smart Piezo Cantilever Beam Using PID Controler. *Int. Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol:03, p:392-399.
- Nestorovic T.,Oveisi A., (2015). Robust Controller for The Vibration Suppression of an active Piezoelectric Beam, *7th ECCOMAS, Smart 2015*.
- Onat C., Küçükdemiral IB., Cetin S., Yüksek İ., (2005). A Comparison Study of Robust Control Strategies for Active Suspension Systems, *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications: 15th-18th June, 2005, Istanbul, Turkey*
- Onat C., Küçükdemiral IB, Sivrioğlu S., Yüksek İ., (2006). LPD Kazanç Programlaması Kullanarak Aktif Süspansiyon Denetleyicisi Tasarımı, *Mühendis ve Makine*, Vol:47, No:562: 51-62.
- Onat C., Küçükdemiral IB, Sivrioğlu S., Yüksek İ., (2007). LPV Based Gain-Scheduling Controller for a Full Vehicle Active Suspension System, *Journal of Vibration and Control*, Vol:13, No:11: 1629-1666.
- Onat C., Küçükdemiral IB, Sivrioğlu S., Yüksek İ. Cansever G., (2009). LPV Gain-Scheduling Controller Design for a Nonlinear Quarter Vehicle Active Suspension System, *Trans. of the Institute of Measurement and Control*, Vol:31, No:1: 71-95.
- Onat C., Sahin M., Yaman Y., (2010). Active Vibration Suppression of a Smart Beam via  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  Control. *IWPMA 2010, International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators*, 10-13 October 2010, Antalya, Turkey.
- Onat C., Sahin M., Yaman Y., (2011). Active Vibration Suppression of a Smart Beamby Using an LQG Control Algorithm, *2nd International Conference of Engineering Against Fracture (ICEAF II)*, 22-24 June 2011, Mykonos, Greece.
- Onat C., Sahin M., Yaman Y., (2011). Active Vibration Suppression of a Smart Beam by Using a Fractional Control, *2nd International Conference of Engineering Against Fracture (ICEAF II)*, 22-24 June 2011, Mykonos, Greece.
- Onat C., Sahin M., Yaman Y., Prasad E. ve Nemana S., (2011). Design of an LPV Based Fractional Controller for the Vibration Suppression of a Smart Beam. *CanSmart2011, International Workshop on Smart Materials&Structures and NDT in Aerospace*, 02-04 November 2011, Montreal, Canada.
- Onat C., Sahin M., Yaman Y., (2012). Fractional Controller Design for Suppresing Smart Beam Vibrations, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol: 84, No:4, 203-212.
- Onat C., SahinM., Yaman Y., (2013). Optimal Control of a Smart Beam by Using a Luenberger Observer, *ICEAF III, 3rd International Conference of Engineering Against Failure*, 26-28 June 2013, Kos, Greece.
- Onat C., (2014). WGC Based Robust and Gain Scheduling PI Controller Design for Condensing Boilers, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol: 2014, 1-13.
- Turan A., Sahin M., Onat C., (2019). Active Vibration Suppression of a Cantilever Beam via a PID Controller Designed Through Weighted Geometrical Center Method, *10th Ankara International Aerospace Conference, AIAC 10*, 18-20 September, 2019, Ankara, Turkey.
- Ros N. F. M., Saad M. S., Darus I. Z. M., (2015). Dynamic Modeling and Active Vibration Control of a Flexible Beam: A Review, *Int. Journal of Engineering & Technology*, Vol: 15, No:05, pp:12-17.
- Saad M. S., Jamaluddin H., and Darus I. Z. M., (2011). Active Vibration Control Of Flexible Beam System Using Proportional Control Scheme In Finite Difference Simulation Platform, *Fourth*

- International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization, pp.1–5.
- Saad M.S., Jamaluddin H., and Darus I.Z.M., (2012). Active Vibration Control of Flexible Beam Using Differential Evolution Optimisation, *World Academy of Science and Technology*, pp. 419–426.
- Sahin M., Karadal F. M., Yaman Y., Kircali O. F., Nalbantoglu V., Ulker F. D., ve Caliskan T., (2008). Smart structures and their applications on active vibration control: Studies in the Department of Aerospace Engineering, METU. *Journal of Electroceramics*, 20(3-4):167–174.
- Shouwei G., Zhiyuan G., Yong S., Jincong Y., Xiaojin Z., (2010). Performance Analysis and Comparison of FXLMS and FULMS Algorithm For Active Structure Vibration Control, *International Conference of Advance Computer Control*, vol.1, pp. 197–201.
- Silva S.,Junior V. L., Assunçao E., (2004). Robust Control to Parametric Uncertainties in Smart Structures Using Linear Matrix Inequalities, *J. Of the Braz. Soc. of Mech. Sci&Eng.* 2004, Vol: XXVI, No:4:430-437.
- Sridevi M.,Madhavasarma P. (2010), Model Identification and Smart Structural Vibration Control Using  $H_{\infty}$  Controller, *Int. Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol: 3, No:4:655-671.
- Yaman Y., Ülker F. D., Nalbantoğlu V., Çalışkan T., Prasad E, Waechter D., Yan B., (2003). Application of  $H_{\infty}$  Active Vibration Control Strategy in Smart Structures, AED2003, 3rd International Conference on Advanced Engineering Design, Paper A5.3, Prague, Czech Republic, 01-04 June, 2003.
- Zorić N.D., Simonović A.M., Mitrović Z.S., Stupar S.N., Obrdović, and Lukić N.S., (2014). Free Vibration Control of Smart Composite Beams Using Particle Swarm Optimized A.M. Self-Tuning Fuzzy Logic Controller, *Journal of Sound Vibration*, vol. 333,pp.5244–5268

## Low order $H_\infty$ controller design for a smart beam with parameter varying

### Extended abstract

Lightweight flexible aerospace structures require a proper active control mechanism to attenuate the vibration levels they experience, in order to preserve their structural integrity. Recent technological developments on piezoelectric materials have successfully paved ways for active vibration control applications. The piezoelectric materials offer cost effective solutions when used in the active vibration suppression of flexible structures due to their direct (i.e. sensing) and converse (i.e. actuation) piezoelectric effects.

A smart structure usually consists of a passive metallic and or composite structure with elements called the smart materials. The smart structure can sense external disturbances and respond to those in real time. The smart materials are used as sensors and/or actuators and are either embedded in and/or surface bonded to the existing passive structure.

In this study, a smart beam equipped with PZT patches are used. It is an aluminum, cantilever beam with dimensions of 350x30x2 mm. Four BM500 PZT patches having dimensions of 25.4x25.4x0.50 mm stuck in bimorph condition. The variations in system physical parameters were represented by different angles at which the servo mechanism arm assumed. Hence the cases of  $+64^\circ$ ,  $+32^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-32^\circ$  and  $-64^\circ$  were considered in order. For each case the actuator PZT patches were given a chirp sine wave with a range of 5 Hz to 30 Hz and the system response were measured by using from sensor PZT patches. These input-output data have been converted to frequency response function through a FFT (Fast Fourier Transformation) by using MATLAB.

$H_\infty$  based controllers are especially suitable for systems in which the system parameters can vary. This study presents a low order  $H_\infty$  controller which was designed to suppress the flexural vibrations of a system with varying parameters. The controller was designed and implemented to a smart cantilever beam. In order to design a reduced order  $H_\infty$  controller a, the lowest possible order, second order analytical model was obtained from the experiments. Therefore for each five position of the servo mechanism second order system model were obtained. Then the numerator polynomial equations, which actually represent the antiresonance frequencies, were omitted and the system was simulated as if it was a massspring-damper system.

The analogical model corresponding to the mean value of servo bar position is perturbed and, crude  $H_\infty$  controller is computed by using that model. In the final stages of the design, the anti-resonance polynomial which was previously neglected is suitably included into the controller. If only the polynomial having the highest antiresonance frequency is used then the LTI (Linear Time Invariant)  $H_\infty$  controller is synthesized. It is believed that the developed controller is superior to other  $H_\infty$  controller designs in literature and advantageous in terms of the following criteria:

- The anti-resonance frequency which complicates the controller design had been successfully omitted.
- A lowest possible order of second order can successfully be used in the design.
- No reduction has been attempted for the implication of the developed controller.
- No additional compensator has been utilized for performance increase.

This study presented a new  $H_\infty$  controller design. The first flexural vibrations of a smart beam with varying physical parameters were tried to be suppressed. The time domain and frequency domain experiments conducted for five different cases had revealed that the designed low order LTI  $H_\infty$  controller performed satisfactorily for all the cases and controlled the effects of changes of system physical parameters. It is believed that the systems where their physical parameter changes can be measured and/ or can be observed and/or can be estimated by an artificial network are suitable candidates for the efficient application of gain scheduling  $H_\infty$  controllers.

**Keywords:** Smart beam, Vibration, Robust control,  $H_\infty$  controller, Parameter uncertainty.



## Meta-Genomik Gen Analizi için Filtre Tasarımı

**İbrahim SAVRAN\***

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Trabzon  
[savran@ktu.edu.tr](mailto:savran@ktu.edu.tr) ORCID: 0000-0002-4155-0485 Tel: (462) 377 4346

**Esra ERDEN**

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Trabzon  
[esraerden@gmail.com](mailto:esraerden@gmail.com) ORCID: 0000-0003-3204-7535

Geliş: 13.12.2018, Revizyon: 27.05.2019, Kabul Tarihi: 28.05.2019

### Öz

Bazı virüsler hariç tüm canlılarda kalıtımın temel yapısını nükleik asitler oluşturmaktadır. Bilim insanları kalıtım üzerine çeşitli çalışmalar yapmıştır. Yapılan araştırmalar ve deneyler sonucunda bilginin depolanması, bilgiye ulaşma ve bilginin analizinin rahat bir şekilde yapılmasına gerek duyulmuştur. Bunun için biyolojinin bilgisayarlar üzerinde kullanımı 1960'lı yıllarda başlamıştır. Sonrasında bilgisayar bilimleri geliştikçe biyolojinin gelişmesi ve araştırma alanları da artmıştır. Gelişmeler arttıkça biyolojinin büyük çaplı deneyler, makro molekül yapıları, DNA ve RNA gibi alanlarda araştırmaları daha çok olmaya başlamıştır. Son 50 yıl boyunca, hastalıklardaki artış bilim insanlarını DNA dizilimleri üzerinde çalışma yapmaya yönlendirmiştir. 1970'lerin başlarında ilk DNA dizileri üniversite araştırmacıları tarafından bulunmuştur. Daha sonralardan Sanger ve arkadaşları geliştirdikleri dizileme yöntemi ile insan genomunu dizilemeyi başaranca Yeni Nesil Dizileme kavramı ortaya çıkmıştır. Yeni Nesil Dizileme yöntemi kullanılarak çok büyük boyuttaki gen sekanslarına dizileme yapılmıştır. Ancak gen sekanlarının uzunlukları çok büyük olduğu için dizileme yapılırken hatalar ile karşılaşılır. Ayrıca ideal DNA dizileme daha hızlı ve kolay çözüme ulaşmalıdır. Bu çalışmada gen sekanlamadaki hataları azaltma üzerinde çalışılmıştır. Bir filtre yardımı ile büyük boyuttaki gen sekanlarını benzerlik açısına göre birkaç kümeye ayrılmıştır. Ayrılan bu dizilerde doğru sıralamalar elde edilmeye çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** DNA dizileme; Biyoinformatik; Yeni nesil dizileme; Meta-genomik gen; Sonek ağacı; Filtre,

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Canlılarda nesilden nesile geçen bilgileri içeren ve canlının birçok özelliğini belirleyen kalıtımı sağlayan temel yapı taşı nükleik asitlerdir. Nükleik asitler bir fosfat, bir deoksiriboz veya riboz bir de azot içeren bir kimyasal bileşiktir. Bir DNA genomu üzerindeki Adenin, Guanin, Timin ve Sitozin bazlarının sıralarının belirlenme işlemine *dna dizileme* denilmektedir. DNA parçalarına ait bu nükleotid sıralarının belirlenmesi; DNA bölgesinin hangi proteini kodlayabileceğine ilişkin bilgilerin elde edilmesinde, genomik DNA dizisi ile tamamlayıcı DNA'ya ait dizi bilgilerinin karşılaştırılarak ekson ve intronların ortaya çıkarılmasında, DNA dizi analizi ile gen aktivitesini kontrol eden bölgelerin tanımlanmasında, spesifik DNA dizilerinin belirlenmesi ile evrimsel akrabalık ilişkilerinin tanımlanmasında kullanılmaktadır (Türktaş, 2011). DNA dizileme biyolojik işlemleri ve araştırmaları çok hızlandırmıştır. Öyle ki 3 milyar DNA baz çiftine sahip olan insan genomu bile DNA dizileme yöntemlerinin gelişmesi ile dizilenmiştir.

1866 yılında, Mendel'in bezelye üzerinde melezleme çalışmaları yapmasıyla kalıtımın ilkelerini ortaya çıkarılmıştır. 1944 yılında Oswald T. Avery ve arkadaşları DNA'nın genetik bilgiyi aktardığına dair ilk kanıtı bakterilerle yaptığı çalışmalardan elde etmişlerdir. Çalışmada zatürre hastalığına neden olan bakteriler kullanılmıştır. Canlı kapsülsüz bakteriler fareye enjekte edildiğinde fare zatürreye yakalanmamış ve yaşama-ya devam etmiştir (Kushner ve Samols,2011). 1953 yılında Watson ve Crick DNA'nın çift sarmal yapısını keşfetmişlerdir ve diğer benzer araştırmalar nükleik asit dizileme sistemlerinin kökenini oluşturmuştur (Pray, 2008).

İlk zamanlarda dizileme çalışmaları çok uzun sürmekte ve çok zahmetli bir iş olmuştur. RNA dizilemesi, baz dizilemesinin ilk basamağı olmuştur. İlk DNA dizileri 1970'lerin başlarında üniversite araştırmacıları tarafından iki-boyutlu kromatografiye dayanan zahmetli yöntemlerle elde edilmiştir. Otomatik analizle çalışan boyatabanlı dizileme yöntemlerinin gelişimiyle (Olsvik vd., 1993) DNA dizilemesi çok daha ko-

laylaşmış ve birkaç büyüklük mertebesi hızlandırmıştır (Pettersson vd.,2009).

1973 yılında, zahmetli bir yöntem olan Wandering-Spot Analiz yöntemi kullanılarak 24 bazın dizisi yayınlanmıştır. Ancak 1975 yılında, Frederic Sanger ve arkadaşlarının *Zincir sonlandırma yöntemi ya da Sanger dizileme yöntemi* geliştirilmesi ile daha güvenilir, daha kolay ve daha hızlı olmasından dolayı bu yöntem daha çok kullanılmaya başlanmıştır (Sanger vd., 1977). Floresan boya ile işaretli dideoksi nükleotid trifosfatlar (ddNTP)'rın kullanıldığı Sanger yöntemiyle çok sayıda örnek aynı anda dizilenmektedir. Her çalıştırılışında 400-800 arası baz uzunluğuna sahip DNA dizileri yüksek doğrulukla okunabilmektedir. Bu yöntem günümüze kadar en çok kullanılan DNA dizileme yöntemi olmuştur (Bentley vd., 2008), ( Stein, 2004). Sanger dizileme (Zincir sonlandırma) ve floresan tabanlı elektroforez teknolojileri kullanılarak insan DNA dizisinin büyük çoğunluğu tanımlanmıştır.

1986 yılında ilk yarı otomatik DNA dizileme makinesini bulunmuştur ve bilgisayarların kullanılmaya başlanmasıyla günümüzde DNA dizilemesi son derece hızlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

1990 yılında çeşitli kuruluşların, sağlık örgütlerinin ve 16 ülkenin katılımıyla İnsan Genom Projesi'ne resmi olarak başlanmıştır (Bentley vd., 2008). İnsan genomu projesi ile insan haploit genomuna ait 3,3 milyar nükleotit baz dizisinin belirlenmesi ile genomdaki mevcut bütün genlerin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk yıllarında insan genomuyla ilgili büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. İnsan genom projesi DNA dizilemenin daha da gelişmesini sağlamıştır. Proje kapsamında çalışılan ve ilk tamamlanan insan genom dizilemesi, 10 yıllık bir süre sonunda yaklaşık 3 milyar dolarlık bir maliyetle tamamlanmıştır (Stein, 2004). İnsan genom projesinin bitirilmesi ile birlikte yeni nesil dizileme olarak adlandırılan masif paralel dizileme yöntemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Yeni Nesil Dizileme yönteminde kullanılan ilk Next generation sequencing (NGS) cihazı ise



2005 yılında kullanıma sunulmuştur (Margulies vd., 2005).

Sanger Dizileme Yöntemi insan genomu projesi, belirli hayvan ve bitki genomlarını başarılı bir şekilde tamamlanmasında kullanılmıştır (Ulutin, 2005). İnsan genomu projesinde karşılaşılan zorluklardan dolayı daha hızlı, daha ucuz, daha doğru sonuçlar üretebilen bir DNA dizileme yöntemi olan Yeni Nesil Dizileme (YND) bulunmuştur. Sanger dizileme tekniği ile genom dizileme projeleri uzun zaman alır iken günümüz dizileme yaklaşımları ile kısa sürede (bir hafta gibi bir süre) tamamlanabilmektedir. Bu yöntemle elde edilen bir mikrobiyal genom dizisi araştırmacılara başka hiçbir deneysel yöntem ile elde edilemeyecek kadar zengin ve özgün bilgi sağlamaktadır. Örneğin 4.6 Mb'lık E.coli genomu tek bir okuma ile tamamlanabilmektedir. Yapılan bir çalışmada E.coli genomu dört kere, her bir koşmada 400.000 okuma yapılarak de novo dizilenmiş ve sekanslamaların %99.997 ile %99.999 arasında doğrulukla yapıldığı tespit edilmiştir (Margulies vd., 2005).

Dizileme çalışmalarından elde edilen bilgiler, biyoloji ile bilgisayarın birlikte kullanımından meydana gelmiş olan biyoinformatik alanının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Biyoinformatiğin amaçlarından ilki verileri, araştırmacıların kolaylıkla ulaşabileceği şekilde düzenlemek ve yeni veriler üretildikçe hızlı bir şekilde kaydetmektir. Biyoinformatiğin bir diğer amacı verilerin anlamlı duruma gelmesini sağlayan araçlar ve kaynaklar geliştirmektir.

Mikroçiplerdeki ilerlemeler sayesinde milyonlarca nükleotide sahip genomlar arasında benzerlik ilişkileri kurulabilmiştir ve bu genomların karakterizasyonu yapılabilmektedir. 5.368 baz çifti büyüklüğündeki bakteriyofaj fx174 genomu sekanslanan ilk viral genomdur (Sanger, 1977).

Yeni nesil dizileme yönteminin çok fazla olumlu yanı olmasına rağmen büyük boyuttaki verilerin analizleri, değerlendirmesi ve depolanmasında sorunlar ortaya çıkmıştır (Üstek, 2011). Sorunların çözümlenerek yeni nesil dizileme yönteminin başarılı sonuçlar üretmesi için gelişmiş biyoinformatik araçlarına ihtiyaç duyulmuştur.

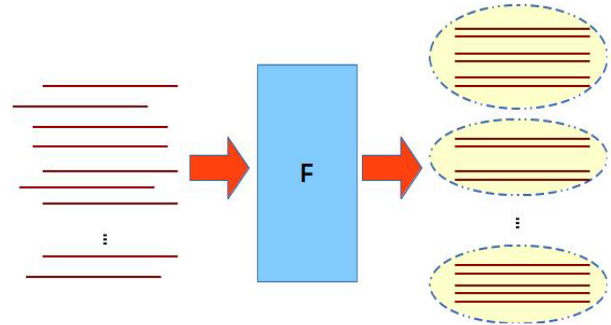
Bu araçlar canlıların DNA dizilimlerini okuyup analiz eder. Gen sekansları çok büyük uzunlukta olmalarından kaynaklı olarak hesaplama açısından pahalıdır, DNA dizilimlerini okumak zordur ve okurken çeşitli hatalar ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada hata durumlarının olmaması için bir filtre modülü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Filtre modülü ile çok büyük uzunluktaki veriler, benzerliklerine göre kabaca gruplandırılmıştır. Daha sonra bu gruplar arasında hizalama aşaması devreye girecektir. Kısacası filtre modülü yeni nesil dizilemedeki verileri belirli bir eşığe göre kabaca gruplamaktır.

## Materyal ve Yöntem

### Filtre Tasarımı

Filtre, meta-genom gen dizilerinin benzerliklerine göre kabaca gruplanmasını sağlayan bir modüldür. Meta-genom gen dizisi öncelikle filtre yardımı ile gruplanır, sonrasında hizalama modülüne gönderilir.



Şekil 1. Filtre modülü.

### Sonek ağacı ve PaCE filtresi

Sonek ağacı bir dizideki verilere erişmek için sonek dizisinin kullanan, bir kümeleme aracıdır. Bir kökten başlayıp yapraklara ayrılarak diziyi kümelere ayırmaktadır. PaCE filtresi ise dizideki verileri kümeleme yaparken sonek ağaçlarını kullanan bir yazılımdır.

## a) Sonek ağacı

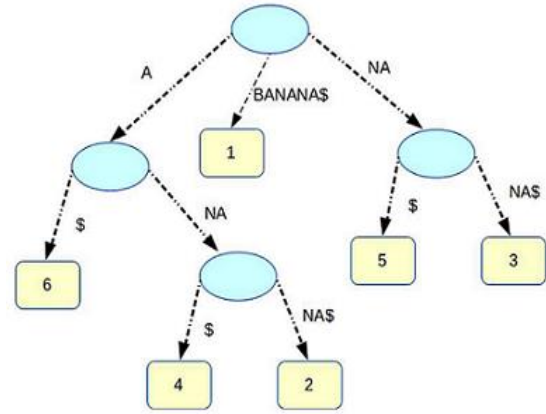
Bilgisayar bilimlerinde en yüksek erişim hızını sağlayan veri yapıları ağaçlardır ve ağaçlar bu özelliklerini hiyerarşik yapılarına borçludur (Cormen, 1989). Sonek ağacında bir tane kök düğüm bulunmaktadır ve tüm arama işlemleri kök düğümünden başlamaktadır. Kök düğümünden yaprak düğüme giden yolda karşılaşıcağımız alt düğümlerin birleşimi bir soneki temsil etmektedir. Hangi boyutta olursa olsun, tüm sonekler için ağaçta bir yol oluşturulur.

Sonek, bir dizide bir karakterden başlayıp dizinin sonuna kadar devam eden bir alt dizidir. Sonekler bir ağaca öyle şekilde yerleştirilirler ki birbirine benzer karakterler ile başlayan iki sonek, sonek ağacı boyunca aynı yolu izlerler. Yol, kök düğümünden başlar ve sonekler arasında bir farklılık oluşuncaya kadar aşağı doğru ilerler. Farklılaşmanın başladığı noktadan itibaren soneklerin her biri ayrı yol izlerler (İnan, 2003).

Biyoinformatikte de sıklıkla kullanılan sonek ağacı kelime işleme algoritmalarından biridir. DNA dizileri çok büyük uzunlukta olduklarından analizlerinin elle yapılması mümkün değildir. Sonek ağacı kullanılarak hızlı bir şekilde dizilerin birbirleri ile uyumlu olup olmadığı kontrol edilmektedir.

n uzunluğunda bir S stringinin sonek ağacının özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Köke sahip bir ağaçtır ve yönlüdür.
- 1-n arasında yaprağa sahiptir.
- Kök olmayan her ara düğüm en az 2 yaprağa sahiptir.
- Bir düğümünden çıkan kenarlar farklı karakterler ile başlar.



Şekil 2. "BANANA" dizisi için sonek ağacı örneği.

Manber ve Myers, 1990 yılında sonek ağacının verilerini dizilemek için bir algoritma önermiştir (Manber ve Myers, 1990). Bu algoritmada en uzun ortak önek (LCP) dizisi ve  $O(n \log n)$  karmaşıklığı hesaplanmıştır. LCP dizisi, sıralı sonek dizisindeki ardışık eklerden en uzun öneklerin uzunluklarını tutmaktadır. Sonek dizileri genellikle LCP dizilerine ihtiyaç duymaktadır ve sonek dizileri ile sonek ağaçları arasında ilişkisel olarak bir bağlantı bulunmaktadır. Sonek dizisi hesaplandıktan sonra LCP dizisi, en uzun ortak önekleri belirlemek için sözcüksel olarak ardışık ekleri karşılaştırarak oluşturulur.

Tablo 1. "banana" sonek dizisi ve LCP dizisi.

i	Sonek	Sonek	A(i)	LCP(i)
0	banana\$	\$	6	
1	anana\$	a\$	5	0
2	nana\$	ana\$	3	1
3	ana\$	anana\$	1	3
4	na\$	banana\$	0	0
5	a\$	na\$	4	0
6	\$	nana\$	2	2

Sonek ağacı, en yüksek erişim hızını sağladığı için büyük bir öneme sahiptir. Sonek ağacının önemli avantajları olmasına rağmen bir diğer yandan dezavantajları da bulunmaktadır. Ağacın fazla yer kaplaması, kötü bellek yerleşimi ve ağacın dengesiz yapısı dezavantajları oluşturmaktadır. Bu gibi sebeplerden ötürü ağacın oluşturulma süreci çok uzun sürmektedir.

b) PaCE filtresi

PaCE filtresi, gen dizilerini kümeleme yapmak için sonek ağacını kullanan, açık kaynaklı ve MPI tabanlı olan bir yazılımdır. Büyük ölçekli verilerinin hızlı bir şekilde kümelenmesini sağlamak için, paralel bilgisayarlarda verilerin kümelemesi için bir yazılım programı olan PaCE filtresi kullanılmaktadır (Kalyanaraman, 2003). Aynı zamanda hızından dolayı, farklı parametrelerle çoklu çalışmaların yapılmasını sağlamaktadır ve biyologlara gen sekans verilerini daha iyi analiz etmek için bir araç sağlamaktadır.

-	-
5	a\$
-	-
1	anana\$
-	-
4	na\$
2	nana\$

Tablo 3. Sonek dizisi alt dizisi 2.

i	sonek
6	\$
-	-
3	ana\$
-	-
0	banana\$
-	-
-	-

Skew Algoritması, Ko ve Aluru'nun (KA) Algoritması

Hem skew algoritması hem Ko-Aluru'nun algoritması sonekler üzerinde çalışmaktadır. Büyük boyuttaki sonek dizilerini alt dizilere bölerek işlem yapmaktadırlar.

a) Skew algoritması

2003 yılında Kärkkäinen and Sanders (Kärkkäinen ve Sanders, 2003) sonek ağaçlarının yapısını kullanarak bir string için bir sonek dizisi oluşturan optimal bir algoritma oluşturmuşlardır. Bu algoritma *skew algoritması* olarak adlandırılmıştır.  $O(n)$  karmaşıklığına sahiptir ve  $n$  tane öğeyi sıralamak için ise  $O(n \log n)$  karmaşıklığına sahiptir. Sonek dizisi atomik öğeleri dizilemek için indirgendiğinden algoritma verimli sıralamanın kullanılabildiği her modelde kullanılabilir. Skew algoritması önceki lineer zamanlama algoritmalarından çok daha basittir (Kärkkäinen ve Sanders, 2003].

Algoritma bir tamsayı alfabesine ( $\Sigma$ ) sahiptir ve bu alfabe üzerinde çalışmaktadır. Genel olarak algoritmanın amacı sonekleri bölmektir. "banana" stringine skew algoritması aşamaları uygulanmıştır. Tablo 1' de ve Tablo 2'de skew algoritmasının 1.ve 2. aşamaları sonucunda oluşan alt diziler gösterilmiştir. Tablo 3'te ise 1. ve 2. Tablolarda elde edilen alt dizelerin birleştirilmiş hali gösterilmektedir.

Tablo 2. Sonek dizisi alt dizisi 1.

i	sonek
---	-------

Tablo 4. Alt dizileri birleştirme.

i	sonek
6	\$
5	a\$
3	ana\$
1	anana\$
0	banana\$
4	na\$
2	nana\$

Algoritma 1: Skew algoritmasının doğrusal zamanlı alfabeler üzerindeki sonek dizisi.

1.  $i \bmod 3 = 0$  pozisyonundaki kısa soneklerden başlanarak sonekler art arda sıralanır.
2.  $i \bmod 3 \neq 0$  pozisyonunda, 1.adımdaki soneklere göre kalan sonekler sıralanır.
3. 1. ve 2. adımdaki sonek dizileri birleştirilir.

$$G^{\neq 0} = \left\{ \begin{array}{l} (1, 'anana$'), (2, 'nana$'), \\ (4, 'na$'), (5, 'a$') \end{array} \right\}$$

$$G^{=0} = \left\{ \begin{array}{l} (0, 'banana$'), (3, 'ana$'), \\ (6, '$') \end{array} \right\}$$

Skew algoritmasının 1. ve 2. Adımları sonucunda oluşan diziler gösterilmektedir. Daha sonrasında bu iki adım sonucunda bulunan diziler birleştirilmektedir.

s	b	a	n	a	n	a	\$
Type	L	S	L	S	L	L	S/L

Pos	0	1	2	3	4	5	6
-----	---	---	---	---	---	---	---

bucket	\$	a	a	a	b	n	n
Step-2	6	5	3	1	0	2	4
Sorted Order	6	5	3	1	0	4	2

### b) Ko ve Aluru'nun Algoritması

Çok yakın zamanda, hem zaman hem de uzay üzerindeki araştırmalar daha verimli ek yapı dizisi algoritmaları (SACA'lar), büyük ölçekli uygulamalar için, web arama ve biyolojik genom veri tabanları gibi sonek dizileri yapılarının artan ihtiyacı nedeniyle giderek daha hızlı bir arayışa dönüşmüştür. Büyük veri kümelerinin büyüklüğü genellikle milyarlarca karakterde ölçülür. Şimdiye kadar elde edilen en son sonuçlar arasında en hızlı lineer SACA algoritması Ko ve Aluru'nun KA algoritmasıdır (Kim vd., 2003).

Ko ve Aluru'nun algoritması komşunun son eki ile bir sonraki sonekin söz dizimsel sıralamasına dayanmaktadır. Algoritma, S ve L tipinde iki adet sonek dizisinin etiketlenmeye başlanması ile başlamaktadır. Sınıflandırma şu şekilde yapılır: eğer  $suff_i < suff_{i+1}$  ise  $suff_i$  S sınıfında bir sonek, eğer  $suff_{i+1} < suff_i$  ise  $suff_i$  L sınıfında bir sonektir. En son ek S/L olarak etiketlenir. S tipi soneklerin konumları stringi bir dizi alt dizeye ayırır. Bu alt dizelerin her biri, tüm alt dizeler arasındaki sırayla değiştirir ve yeni bir dize oluştururlar. Yeni dizinin sonekleri daha sonra tekrar sıralanır. Sonek dizisi, tüm S tipi soneklerin sözlüksel kurallarını verir. Diğer tüm soneklerinin sırası bu sıradan çıkarılabilir.

**Algoritma 2.** Ko – Aluru'nun algoritması.

```

suffn-1 = S/L
for i = n-2 down to n
  if si < si+1, suffi S tipinde.
  if si > si+1, suffi L tipinde.
  if si = si+1, suffi suffi+1 tipinde.
end for

```

Ko ve Aluru'nun algoritması, 3 özyinelemeli adımdan oluşmaktadır. İlk adımda daha karmaşık kodlama sözcüklerine sahip olan S substringleri daha küçük dizilere indirgenir. Böylece büyük problem küçük parçalara ayrılmış olur. İkinci

adımda küçük dizilere ayrılmış problemlerin sonek dizileri tekrarlı olarak hesaplanır. Son adımda özyinelemeli seviyeye göre indirgenmiş problemin soneklerinin sırası, indirgenmiş problemin sonek dizisine dizi bitene kadar yazılır. Ko-Aluru'nun algoritmasının aşamaları aşağıda detaylıca anlatılmıştır (Ko ve Aluru, 2003).

Oluşan alt dizeler arasında sıralamayı doğru şekilde yapmak için veriler yer değiştirir. B, dizinin tüm son eklerini içeren bir dizi olsun. C, S tipi tüm son eklerin sıralanmış bir dizisi olsun. C'yi kullanarak, tüm soneklerin sırasını aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

1. Dizinin tüm soneklerini B'deki ilk karakterlere göre gruplandırılmaktadır.
2. C dizisi taranır. Taramada karşılaşılan her sonek için, C dizisinin içindeki geçerli ucuna taşınır ve geçerli ucu bir konum sola doğru ilerletilir. Bu adımdan sonra, tüm tip S sonekleri B'deki doğru konumlarındadır.
3. Eğer her bir B girişi için, eğer  $suff_{B_i-1}$  bir L tipi sonek ise, geçerli dizideki biriktirme yeri geçerli ön kısmına getirilir ve biriktirme yeri önünü birer birer ilerletilir. Bu adımın sonunda, B, S'nin sonek dizisidir.

### Uygulama ve Başarımlar

Bu çalışmada, filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Filtre modülünde, t stringi kümülatif bir sonek dizisinin hesaplanması için bir çekirdek görevi uygulamaktadır. t stringi, S kümesinde  $s_i$  stringlerin bileşiminden oluşmaktadır. t stringinin sonek dizileri (S,A) oluşturulduktan sonra, girişler filtre çekirdeği için hazır durumdadır. Ancak bunun yanında toplam t stringinin kopyalanması ile bir  $s_i$  dizisini eşleştirmesini önlemek için çekirdeğe yönelik ilave bir adım atılmalıdır. Bu ilave durum da Algoritma 3 ile çözülmektedir (Savran, 2014).

**Algoritma 3.** Filtre algoritması2.

```

Input : S = {s0, s1, ..., sn-1}
t = ε
for s = s0 : sn-1 do

```

```

t = t + s
end for
Compute suffix array of S A
A= FilterKernel(S A, S)
Align(S,A)

```

Tüm diziler için, dizilerin karşılık gelen kısımlarına uygulanmaktadır. Denklem(1), denklem(2) ve denklem(3) birbiri ile çakışma olasılığı olan gen dizileri gösterilmiştir. Denklem (1)'deki gen dizisi ile denklem (2)'deki gen dizisi arasında "TTCC" bazları, denklem (1)'deki gen dizisi ile denklem (3)'teki gen dizi arasında ise "CAT" bazları çakışmaktadır.

$$S_j = ..TTCCCAT.. \quad (1)$$

$$S_i = ..ACCTTCC ... \quad (2)$$

$$S_{i+1} = ..CATTG.. \quad (3)$$

$S_j$  dizisi, hem  $S_i$  dizisi hem de  $S_{i+1}$  dizisi ile örtüşen "TTCCA" alt dizisine sahiptir. Sonuç olarak çakışma durumunun ortadan kalkması için dizilerin verileri arasına "#" sembolü eklenir ve olası bir çatışma olma durumu ortadan kalkar. Denklem (4)'te ise çakışma durumunun ortadan kalması için yapılanlar gösterilmiştir.

$$T=S_0 + \# + S_1 + \# + \dots \# + S_{n-1} \quad (4)$$

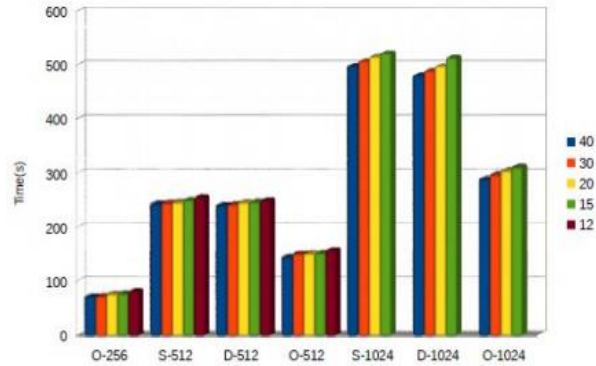
## Sonuçlar ve Tartışma

Filtre modülü, hizalama prosedürüne gönderilecek olan gen dizilerini üretmektedir. Filtreden çıkan sonuçlar paralel programlamada kullanılan PaCE filtresinden çıkan sonuçlar ile karşılaştırarak verimlilik derecesi ölçülmektedir. PaCE filtresini seçmemizin nedeni sonek ağacını kullanması ve açık kaynaklı MPI tabanlı bir filtre olmasıdır.

Meta-genom veri seti örnekleri, 13 tane benzer olan Bacillus genus ve 12 tane benzer olmayan Proteobacteria Phylum olarak toplamda 25 tam bakteri veri setinden oluşmaktadır. Bu verileri NCBI veri tabanından alınmıştır. NCBI veri tabanı 1988 yılında moleküler biyoloji ve genetik alanında kullanılmak üzere oluşturulmuş halka açık bir veri tabanıdır (NCBI).

Bu veriler, MetaSim cihazıyla yeni nesil dizilemeyi sümüle etmektedir. MetaSim cihazı bir sıralama simülatörüdür (Richter,2008). Verilen genomların bir veri tabanına dayanan MetaSim, farklı seviyelerde bulunan genomların sayısını belirlemektedir ve sonrasında yeni nesil dizileme teknolojisinin bir benzetimini kullanarak bir meta-genom tasarlamaya izin vermektedir.

Filtre modülü üç farklı boyuttaki küme üzerinde test edilmektedir (Savran, 2014). İlki temel kümedir ve sadece bir tane NVIDIA K20 GPU içerir. Burada filtre modülü, minimum eşleşme uzunluğunun azaltılmasından sonra daha fazla zamana ihtiyaç duyar.



Şekil 2. Filtre modülü zamanlaması: 1 NVIDIA K20 GPU.

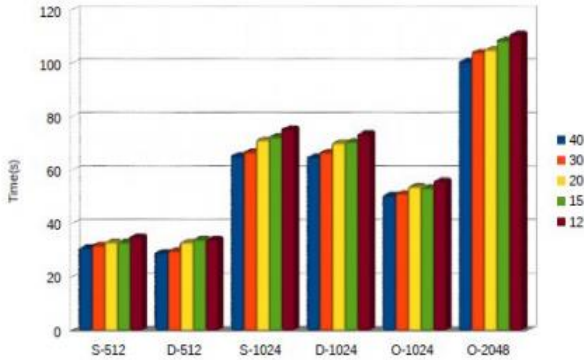
Her bir veri seti için 6X okuma derinliği ve 12X okuma derinliğine karşılık gelen 512K ve 1024K dizileri elde edilmiştir. S-512K, D-512K, S-1024K ve D-1024K şeklinde dört adet test dosyası üretilmiştir.

1 NVIDIA K20 GPU'nun test dosyasının sahip olduğu uzun diziler ile filtre çekirdeğinin gerektirdiği süre Tablo 5'te gösterilmiştir. Eşleşme uzunluğu 15 olarak alındığı zaman, filtre prosedürü (S-1024) için 521.220 sn süre geçmektedir. Filtre, O-1024K test dosyası ortalama 270bp uzunluğunda dizilerden oluşan 311.848'de işlemi tamamlar.

Tablo 5. 1 NVIDIA K20 GPU zamanlama sonuçları.

File name	40	30	20	15	12
O-256	72.302	73.008	77.115	78.179	82.425
S-512	244.086	245.733	247.115	251.594	255.962
D-512	241.708	243.206	246.760	247.745	250.601
O-512	145.686	151.749	152.332	153.249	158.653
S-1024	498.332	506.403	514.875	521.220	
D-1024	480.538	488.640	497.512	512.953	
O-1024	289.987	298.071	305.200	311.848	

İkinci küme, 10 NVIDIA K20 GPU'dan oluşmaktadır. 10 GPU kümesi /1 GPU kümesinin ortalama performans oranı 7'dir.



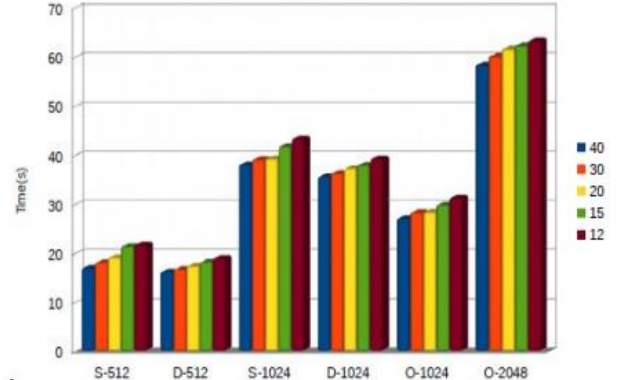
Şekil3. Filtre modülü zamanlaması: 10 NVIDIA K20 GPU.

10 NVIDIA K20 GPU'nun test dosyasının sahip olduğu uzun diziler ile filtre çekirdeğinin gerektirdiği süre Tablo 6'da gösterilmiştir. Eşleşme uzunluğu 15 olarak alındığı zaman, filtre prosedürü (S-1024) için 72.766 sn süre geçmektedir. Filtre, O-1024K test dosyası ortalama 270bp uzunluğunda dizilerden oluşan 53.618 sn'de işlemi tamamlar.

Tablo 6. 10 NVIDIA K20 GPU zamanlama sonuçları.

File name	40	30	20	15	12
S-512	31.098	32.128	33.115	33.182	35.224
D-512	29.319	30.081	33.129	34.305	34.339
S-1024	65.710	66.987	71.440	72.766	75.764
D-1024	65.267	66.879	70.426	70.961	73.812
O-1024	50.865	51.543	53.909	53.618	56.229
O-2048	99.015	102.426	104.367	108.944	109.159

Son olarak üçüncü test kümesinde her özelliği aynı olan 20 GPU kullanılmaktadır. 20 GPU kümesi / 1 GPU kümesi ortalama performans oranı yaklaşık 13,6'dır.



Şekil 4. Filtre modülü zamanlaması: 20 NVIDIA K20 GPU.

20 NVIDIA K20 GPU'nun test dosyasının sahip olduğu uzun diziler ile filtre çekirdeğinin gerektirdiği süre Tablo 7'da gösterilmiştir. Eşleşme uzunluğu 15 olarak alındığı zaman, filtre prosedürü (S-1024) için 41.469 sn süre geçmektedir. Filtre, O-1024K test dosyası ortalama 270bp uzunluğunda dizilerden oluşan 29.941 sn'de işlemi tamamlar.

Tablo 7. 20 NVIDIA K20 GPU zamanlama sonuçları.

File name	40	30	20	15	12
S-512	17.102	18.171	19.245	21.484	21.845
D-512	16.319	16.812	17.529	18.308	19.110
S-1024	38.221	39.242	39.404	41.869	43.443
D-1024	35.716	36.421	37.347	38.110	39.412
O-1024	27.200	28.373	28.442	29.941	31.356
O-2048	56.498	60.256	61.719	61.429	63.423

## Kaynaklar

- Bentley DR, Balasubramanian S, Swerdlow HP, Smith GP, Milton J, Brown CG, et al. Accurate whole human genome sequencing using reversible terminator chemistry. *Nature*. 2008;456(7218):53-9.
- Cormen, T.H., Leiserson, C.E. ve Rivest, R.L. (1989). *Introduction to Algorithms* The MIT Press, Boston.
- İnan O. (2006). Ardışık tekrarlı DNA dizilerinin optimum düzeyde bulunmasına yönelik programlama çalışmaları.
- Kalyanaraman A., Aluru S., Brendel V., Kothari S., Space and time efficient parallel algorithms and software for EST clustering, *IEEE Transactions on parallel and distributed systems*, 14:1209–1221, 2003.
- Kärkkäinen J. Sanders P. Simple linear work suffix array construction, *Automata, Languages and Programming*, Springer Berlin Heidelberg, 943–955, 2003.

- Kim, D.K., Sim, J.S., Park, H., Park, K.: Linear-time construction of suffix arrays. In: Proceedings 14th Annual Symp. Combinatorial Pattern Matching, LNCS 2676, Springer-Verlag. (2003) 186–199.
- Ko P. and Aluru S. Space efficient linear time construction of suffix arrays. In Proceedings 14th CPM, LNCS 2676, Springer-Verlag, pages 200–210, 2003.
- Kushner I. ve Samols D., Oswald Avery and the pneumococcus.,2011
- Manber U., Myers G., Suffix arrays: a new method for on-line string searches. First Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, pp. 319-327, 1990.
- Margulies M, Egholm M, Airman WE, Attiya S, Bader JS, Bemben LA, et.al.. Genome sequencing in microfabricated high-density picolitre reactors. Nature. 2005 Sep 15;437(7057):376-80.
- Olsvik O, Wahlberg J, Petterson B; ve diğerleri. (January 1993). "Use of automated sequencing of polymerase chain reaction-generated amplicons to identify three types of cholera toxin subunit B in *Vibrio cholerae* O1 strains". J. Clin. Microbiol. 31 (1), s. 22-5.
- Pettersson E, Lundeberg J, Ahmadian A (February 2009). "Generations of sequencing technologies". Genomics. 93 (2), s. 105-11.
- Pray, L. (2008) Discovery of DNA structure and function: Watson and Crick. Nature Education 1(1):100
- Richter D.C., Ott F., Auch A.F., Schmid R., Huson D.H. MetaSim - A Sequencing Simulator for Genomics and Metagenomics. PLoS ONE 3(10): e3373, 2008.
- Sanger F, Nicklen S, Coulson AR (December 1977). "DNA sequencing with chain-terminating inhibitors". Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 74 (12): 5463–7.
- Sanger et al., 1977b. Nucleotid sequence of bacteriophage X174 DNA. Nature 265:687-695.
- Savran I., High-performance meta-genomic gene Identification(2014).
- Stein LD.,International Human Genome Sequencing Consortium. Finishing the euchromatic sequence of the human genome. Nature. 2004;431(7011):931-45.
- Türktaş M., DNA Dizi Analizi. Floresan Temelli Yeni nesil genetik analiz uygulamaları: DNA dizi analizi, moleküler markörler uygulamaları ve çoklu gen anlatım analizleri uygulamalı eğitimi kitapçığı, TÜBİTAK (2011).
- Ulutin, T. (2005). İnsan genom projesi. Moleküler Hematoloji ve Sitogenetik Alt Komitesi, Temel Moleküler Biyoloji Kursu,70-72.
- Üstek D. ,Abacı N. , Sırma S. ,Çakiris A.(2011) Deneysel Tıp Araştırma Enstitüsü Dergisi,1(1),11-18.
- Wolpaw R. J., Birbaumer N., McFarland, D.J., Pfurtscheller, G., Vaughan, T.M., (2002). BCI for communication and control, *Clinical Neurophysiology*, 113, 767-791.
- NCBI: National Center for Biotechnology Information. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>  
Erişim tarihi 20 Kasım 2018.

## Filter design (for error correction) in meta-genomic gene analysis

### Extended abstract

*The use of biology on computers started in the 1960s. Thereafter as computer science develops, the development of biology and research areas have increased. As the developments increase, researches on biology have become more common in areas such as large-scale experiments, macromolecular structures, DNA and RNA. Over the past 50 years, the increase in disease has led scientists to study DNA sequences. In the early 1970s, the first DNA sequences were discovered by university researchers. Later, when Sanger et al. succeeded in sequencing the human genome with the sequencing method developed, the Next Generation Sequencing concept emerged.*

*Sequences are used to sequencing large-scale gene sequences using the Next Generation Sequencing method. However, because the length of the gene sequence is too large, errors are encountered during sequencing. Also,, the ideal DNA sequencing should reach a faster and easier solution.*

*In this study, a filter was designed to reduce errors in gene sequencing. The filter design was made by using suffix trees, PaCE filter, Skew and Ko-Aluru algorithms. The suffix tree has a high access rate. It consists of paths starting from root to the leaves. PaCE filter is a software that uses suffix trees to group gene sequences. Analyze gene sequence easily and quickly. The Skew algorithm creates suffix sequences using the suffix tree structure. It is preferred because it is an optimal structure.*

*Ko-Aluru's algorithm has a great advantage for sequencing large data sets. The Ko-Aluru algorithm is based on the syntax sequence of the next suffix with the neighbor's suffix.*

*With the help of the filter, large-scale gene sequences are divided into several groups according to similarity. In this series, the correct sequences are tried to be obtained.*

*The filter module classifies the sequences to be delivered to the other bioinformatics analysis. The results obtained from the filter are compared with the results obtained from the PaCE filter. The reason we chose the PaCE is that it is an open source MPI based filter.*

*Examples of the meta-genome data set consist of a total of 25 complete bacterial data sets, 13 of them are from the Bacillus genus. We called this set as*

*“the similar group.” 12 genomes are called “dissimilar group” from the Proteobacteria Phylum. This genomes are taken from the NCBI database. The NCBI database is a public database (NCBI) created in 1988 for use in molecular biology and genetics.*

*This data is based on a new generation of arrays with the MetaSim application. MetaSim is a sorting simulator (Richter, 2008). Based on a database of genomes, MetaSim generates the synthetic sequences. The 512K and 1024K datasets correspond to 6x and 12x coverage rate. There are “S” and “D” prefixes corresponds to the similar and the dissimilar set. Four test files have been produced in the form of S-512K, D-512K, S-1024K and D-1024K.*

*In the test, we utilized NVIDIA K20 GPUs. When the common substring-length is set to 15, the filter procedure required 521.220 s to evaluate (S-1024) file. On the other hand, the at 311,848 s was required to process the O-1024K test file.*

**Keywords:** DNA sequencing; Biyoinformatic; New generation sequencing; Meta-genomic gene; Suffix tree; Filter design.





## Dairesel kesitli türbülans üreticilerinin ısı performansının araştırılması

**Emre TURGUT**

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[turgutmr@gmail.com](mailto:turgutmr@gmail.com) ORCID: 0000-0002-1504-9080, Tel: (424) 237 00 00 (7657)

Geliş:10.01.2019, Revizyon: 15.03.2019, Kabul Tarihi: 29.04.2019

### Öz

*Bu çalışmada, iç içe iki borudan oluşan eş eksenli bir ısı değiştiricisinin iç borusuna yerleştirilmek üzere hazırlanan dairesel kesitli türbülatorlerin ısı transferi ve basınç kaybı üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Bu analizlere ek olarak, ısı değiştiricisinin performans analizi de yapılmış ve hem ısı transferi hem de basınç kaybı açısından bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Çalışmada; türbülatorler arası mesafe, Reynolds sayısı, türbülator üzerinde bulunan delik sayısı ve delik çapı deneysel parametreler olarak seçilmiştir. Buhar kazanından elde edilen buhar, konsantrik ısı değiştiricisinin iç borusu ile dış borusu arasında meydana gelen halka boşluğa gönderilmiş ve böylece iç borunun dış yüzeyinde sabit sıcaklık şartları sağlanmıştır. Reynolds sayısı 10000 ile 42000 arasında seçilmiş ve çalışma akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Çalışma sonunda ısı transferi ve sürtünme kayıp katsayısı hesaplanmış ve hesaplanan değerler grafiklerle desteklenerek değerlendirilmiştir. Deneylelerden elde edilen sonuçlar boş boru deney sonuçları ve literatürdeki bağıntularla kıyaslanmış ve bu sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Reynolds sayısındaki artış ile beraber ısı transferi değerleri % 460, sürtünme kayıp katsayısı değerleri de % 478 civarında artmıştır. Isıl performans ise; Reynolds sayısındaki artış ile ters orantılı olarak değişim göstermiş ve gerçekleştirilen bütün deneyler için enerji tasarrufu açısından bu türbülator tasarımının uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Isı değiştiricileri, ısı transferi, sürtünme kayıp katsayısı, performans analizi

## Giriş

Birçok mühendislik uygulamasında kullanılan ısı değiştiricileri; farklı sıcaklıklardaki akışkanlar arasında ısı değişimini sağlayan cihazlar olarak adlandırılır. Isı değiştiricileri; gerek konut gerekse sanayide, ısıtma ve soğutma alanlarında geniş bir kullanım alanına sahiptir.

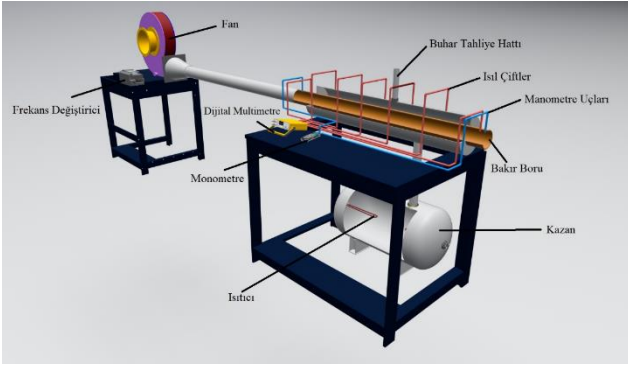
Dönmeli akış üreticileri olarak da adlandırabileceğimiz türbülatorler; solar ısıtıcılar, reaktörler, ısı değiştiricileri, soğutma ve ısıtma gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Türbülatorlerin ısı transferi üzerine olan yararlı etkileri ilk olarak Royds (1921) tarafından araştırılmıştır. Eimsa-ard ve diğerleri (2013) çalışmalarında bükülmüş şerit ve halka şeklinde olan türbülatorlerin birlikte kullanılmasıyla elde ettikleri bir türbülator sistemi tasarlamışlar ve ısı transferi, basınç kayıp katsayısı ve termal performansı incelemiştir. Deneyler sonucunda tasarlanan sistemin halka türbülatorlere göre ısı transferini %25, sürtünme kayıp katsayısını %82 ve termal performansı ise %6.3 oranında artırdığını bulmuşlardır. Promvonge ve diğerleri (2014) silindirik bir boru içine, değişen kalınlık, açı ve hatvede yerleştirilen halka şeklindeki türbülatorlerin bir ısı değiştiricisinin termal performansına olan etkisini incelemiştir. Acır ve Ata (2016) bir dairenin çeyrek diliminin çıkarılmasıyla elde ettikleri türbülatorleri, kendi tasarladıkları bir solar hava ısıtıcısında kullanarak ısı transferi ve basınç kaybı değerlerini hesaplamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre ısı transferinde yaklaşık %416, basınç kaybında ise %511 değerlerine varan artışlar olduğu sonucunu bulmuşlardır. Acır ve diğerleri (2016) dairesel kesitli türbülatorleri araştırdıkları çalışmalarında, Reynolds sayısı, türbülatorler arası mesafe ve türbülator üzerindeki delik sayılarını parametre olarak belirlemişler ve bu parametrelerin ısı transferi üzerine olan etkisini incelemiştir. Isı transferinde 2.29, basınç kaybında ise 5.8 kat değerlerine varan artışlar olduğunu tespit etmişlerdir. Etghani ve Baboli (2017) kangal şeklinde bükülmüş borunun türbülator olarak kullanıldığı bir ısı değiştiricisinde; kangal adımı, soğuk ve sıcak su debileri ve boru çapı olarak belirlenen parametreleri kullanarak sayısal bir

çalışma gerçekleştirmiş ve bu değişkenlerin ısı transferi ve ekserji üzerine olan etkileri inceleyerek optimum değerleri belirlemiştir. Yakut ve diğerleri (2005) değişen yükseklik, hatve ve açı değerlerine sahip olan üçgen kesitli türbülatorlerin ısı transferi ve basınç kaybına olan etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Araştırmacılar, gerçekleştirdikleri Taguchi analizi ile de optimum tasarım parametrelerinin hangi seviyelerde olduğunu belirlemiştir. Şahin ve Demir (2008) üzerine delikler açılmış kare şeklindeki türbülatorlerin optimum tasarım parametrelerini araştırmışlardır. Parametre olarak Reynolds sayısı, kanat yüksekliği ve hatveyi kullanan araştırmacılar ısı transferi için en etkin parametrenin %90 ile Reynolds sayısı, sürtünme kayıp katsayısı için ise %97'lik oran ile kanat yüksekliği olduğunu bulmuşlardır. Kongkaipaiboon ve diğerleri (2010) bir ısı değiştiricisinde kullanılan ve üzerinde değişen sayılarda delik bulunan konik türbülatorlerin ısı transferi, basınç kaybı ve termal performansa olan etkisini incelemiştir. Üç farklı delik sayısı ve üç farklı hatvede gerçekleştirilen çalışmada Reynolds sayısı 4000 ile 20000 arasında seçilmiştir. Deneyler neticesinde, en küçük hatve ve çap oranında en yüksek ısı transferi ve basınç kaybı değerlerinin elde edildiği sonucun ulaşılmıştır. Özceylan ve diğerleri (2008) halka kesitli türbülatorlerin ısı transferi üzerine olan etkisini sayısal olarak incelemiştir. Literatürde türbülatorler ile ilgili pek çok kullanım alanı ve araştırma mevcuttur. Bunlardan bazıları kaynaklar kısmında ek olarak sunulmuştur.

## Materyal ve yöntem

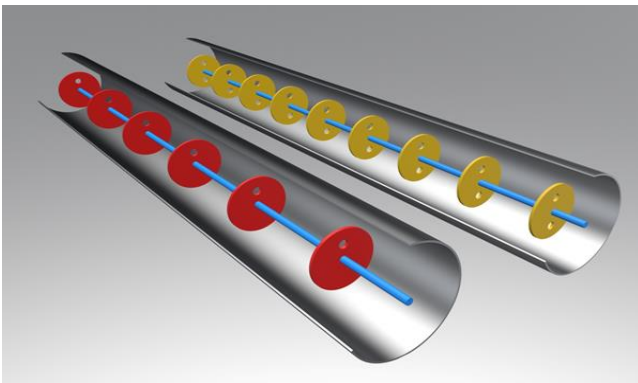
Bu deneysel çalışmada, iç içe iki silindirik borudan oluşan eş eksenli bir ısı değiştiricisi kullanılmıştır. Isı değiştiricisinin iç boru malzemesi olarak, ısı iletim katsayısının yüksek olmasından dolayı bakır seçilmiştir. Bu borunun et kalınlığı 0.5 mm, iç çapı 60 mm ve uzunluğu ise 900 mm'dir. Bakır boruyu içine alan dış boru ise galvanizli sacdan imal edilmiştir. Et kalınlığı 1 mm, çapı 210 mm ve 900 mm'dir. Bakır boru ile galvanizli sac arasında oluşan halka boşluğa gönderilen buhar ile iç borunun dış yüzeyinin

sürekli olarak buhar ile temas etmesi sağlanmıştır. Bu boşlukta yoğunlaşan buhar ise sürekli olarak dış ortama atılmaktadır. Bu şekilde iç borunun dış yüzeyinde sabit sıcaklık şartları sağlanmıştır. Deneyle gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan buhar ise 50 litre kapasiteli bir kazanda bulunan iki adet ısıtıcı vasıtasıyla karşılanmıştır. Çalışmada, akışkan olarak hava kullanılmış ve bu havanın bir fan yardımıyla içteki borudan geçirilmesi suretiyle deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğine ait şematik görünüş Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Isı değiştiricisi fan ve kazandan oluşan deney düzeneği

Bu deney düzeneğinde kullanılmak üzere 35 mm çapında tasarlanan türbülötörler dairesel kesitli olup, türbülötörlere ait çizim Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Türbülötörlerin şematik gösterimi

Deneysel çalışmadaki parametrelere ait seviyeler şöyledir: d=1 ve d=2 olmak üzere bir ve iki delik

bulunmaktadır. Delik çapları  $\phi_1=0.5$  cm,  $\phi_2=1$  cm ve  $\phi_3=1.5$  cm olarak belirlenmiştir. Hatve (türbülötörler arası mesafe) ise  $a_1=5$  cm,  $a_2=10$  cm ve  $a_3=15$  cm olarak seçilmiştir. Reynolds sayısı ise 10000 ile 42000 arasında değiştirilmiştir.

Deneysel çalışmada kullanılan parametreler, parametrelerin değişimleri ve sembolleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Parametrelerin seviyeleri ve semboller

Parametreler	Semboller
a1d1ç1	A1
a2d1ç1	A2
a3d1ç1	A3
a1d2ç1	A4
a2d2ç1	A5
a3d2ç1	A6
a1d1ç2	B1
a2d1ç2	B2
a3d1ç2	B3
a1d2ç2	B4
a2d2ç2	B5
a3d2ç2	B6
a1d1ç3	C1
a2d1ç3	C2
a3d1ç3	C3
a1d2ç3	C4
a2d2ç3	C5
a3d2ç3	C6

Bu çalışmada, bir rüzgârgülü kullanılarak havanın hızı belirlenmiş ve bu hız değerinden faydalanarak Reynolds sayısı hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{V_{ort} d_i}{\nu} \quad (1)$$

bu denklemde  $d_i$  iç borunun iç çapını,  $v$  havanın kinematik viskozitesini ve  $V_{ort}$  ise havanın ortalama hızını ifade etmektedir. Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü değerleri ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Nu = \frac{h_{ort} d_i}{k} \quad (2)$$

$$f = \frac{2\Delta P d_i}{L \rho V_{ort}^2} \quad (3)$$

Bu denklemlerde kullanılan  $h$  taşınım katsayısı ve  $k$  ise havanın ısıl iletkenlik katsayısıdır. Hava ile ilgili bütün termofiziksel özellikler, havanın giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır. İç borunun giriş ve çıkışlarına yerleştirilen dijital manometreler yardımıyla sistemde gerçekleşen basınç düşüşleri tespit edilmiştir. Ölçülen değerler Darcy eşitliğinde yazılarak 3 denklemlerle gösterilen sürtünme faktörü değerleri hesaplanmıştır.

İç borunun dış yüzey sıcaklığı; borunun giriş ve çıkışı boyunca birbirine eşit mesafede yerleştirilen 9 adet ısıl çiftten elde edilen verilerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

$$T = \sum T_y / 9 \quad (4)$$

Bu çalışmada olduğu gibi sabit yüzey sıcaklığına sahip dairesel kesitli bir boruda taşınım ile olan ısı transferi logaritmik ortalama sıcaklık farkı (LOSF) kullanılarak hesaplanır. LOSF değeri:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (5)$$

bağıntısı ile elde bulunur. Burada, sıcaklık farkı değerleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\Delta T_1 = T_y - T_{giris} \quad (6)$$

$$\Delta T_2 = T_y - T_{cikis} \quad (7)$$

Denklem 5'te hesaplanan sıcaklık farkı, taşınım ile olan ısı transferinin gerçekleşme sebebidir. Boruya yapılan yalıtımdan dolayı kayıpların olmadığı ve ısı ile meydana gelen ısı transferinin ihmal edilmesi kabulleri yapılabilir. Bu durumda gerçekte olan ısı transferini taşınım ile olan ısı transferine eşitleyebiliriz. Böylece ısı taşınım katsayısı olan  $h$  değeri hesaplanır. Gerçekte olan ısı transferi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$Q_{gercek} = \dot{m} C_p (T_{\zeta} - T_g) \quad (8)$$

$$Q_{gercek} = Q_{tasinim} \quad (9)$$

$$Q_{tasinim} = h A LOSF \quad (10)$$

$$\dot{m} C_p (T_{\zeta} - T_g) = h A LOSF \quad (11)$$

$$h = \frac{\dot{m} C_p (T_{\zeta} - T_g)}{A LOSF} \quad (12)$$

bu şekilde ısı taşınım katsayısı hesaplanır. Burada;  $A$  içteki borunun yüzey alanı,  $C_p$  akışkanın özgül ısısı,  $T_g$  ve  $T_{\zeta}$  akışkanın iç boruya giriş ve çıkış sıcaklıklarını ifade etmektedir.

Isıl performans faktörü, ısı değiştiricilerinin tasarımı yapılırken göz önünde bulundurulması gereken en önemli parametrelerden biridir. Türbülans üreticilerinin kullandığı ve kullanılmadığı (boş boru) durumlardaki karşılaştırmalar çoğu zaman ısı transfer katsayılarının aynı pompalama gücü altında karşılaştırılmasıyla yapılmaktadır.

Sabit pompalama gücü altında yapılan değerlendirmeler aşağıdaki gibidir.

$$(\dot{Q}\Delta P)_t = (\dot{Q}\Delta P)_0 \quad (13)$$

bu denklemdeki  $t$  indisi türbülantörlü durumu,  $0$  indisi ise boş boruyu ifade etmektedir.

Isıl performans faktörü ( $\eta$ ) ise;

$$(f Re^3)_t = (f Re^3)_0 \quad (14)$$

$$\eta = \frac{h}{h_0} \Big|_{pg} = \frac{Nu_t}{Nu_0} \Big|_{pg} = \left( \frac{Nu_t}{Nu_0} \right) \left( \frac{f_t}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (15)$$

eşitliği ile hesaplanabilir (Eiamsa-ard ve Promvong, 2010; Güneş vd., 2010).

### Uygulama ve başarımlar

Bu çalışmada; silindirik boru içerisine, boru boyunca yerleştirilen dairesel kesitli türbülötörlerin ısı transferi ve basınç kaybına olan etkisi incelenmiştir. Değişen adım, delik çapı ve delik sayısı durumlarına göre gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar grafiklerle desteklenerek sunulmuştur.

Tasarlanan sistemin doğruluğunun ispatlanması için, türbülötör deneylerine başlamadan önce, mevcut çalışmanın boş boru deneylerinden elde edilen ısı transferi ve sürtünme faktör sonuçlarının, literatürde bulunan bağıntılarla kıyaslanması yapılmıştır. Türbülanslı akış durumu için dairesel kesitli borulara ait olan Gnielinski, Dittus-Boelter, Petukhov ve Blasius bağıntıları aşağıda sunulmuştur:

Gnielinski bağıntısı:  $3000 < Re < 5 \times 10^6$  değerleri arasında geçerlidir.

$$Nu = \frac{\left( \frac{f}{8} \right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left( \frac{f}{8} \right)^{1/2} \left( Pr^{2/3} - 1 \right)} \quad (16)$$

Dittus-Boelter bağıntısı: bu bağıntı  $Re \geq 10000$  değerlerinde geçerlidir.

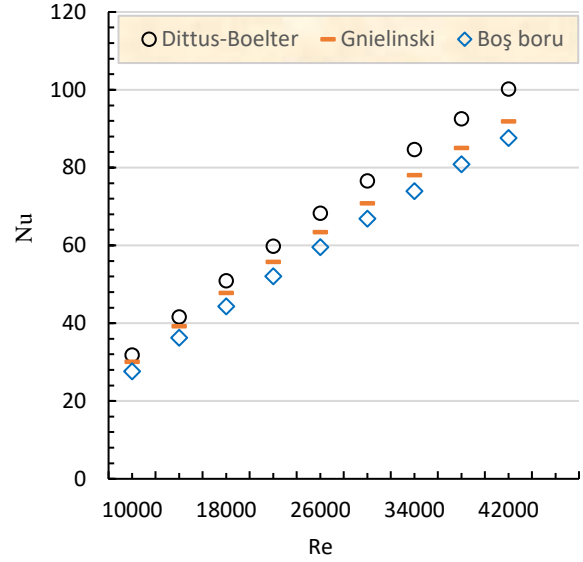
$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (17)$$

Petukhov bağıntısı: bu bağıntı  $3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$  değerlerinde geçerlidir.

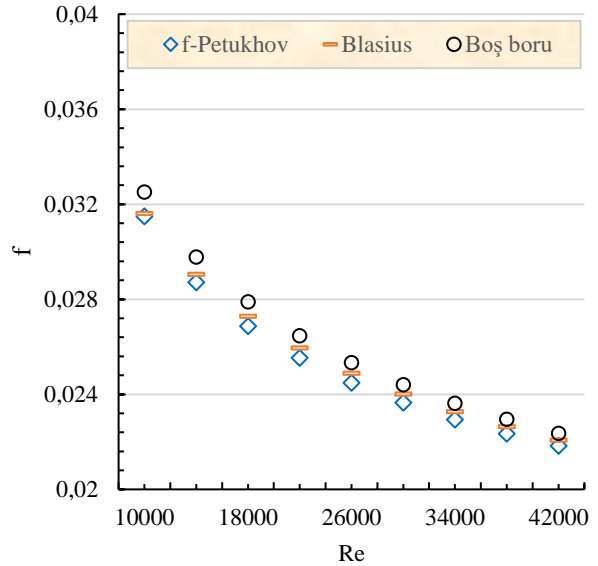
$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (18)$$

Blasius bağıntısı: bu bağıntı  $Re \leq 120000$  değerlerinde geçerlidir.

$$f = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (19)$$



Şekil 3. Boş boru için Nu sayısının ampirik bağıntılarla kıyaslanması



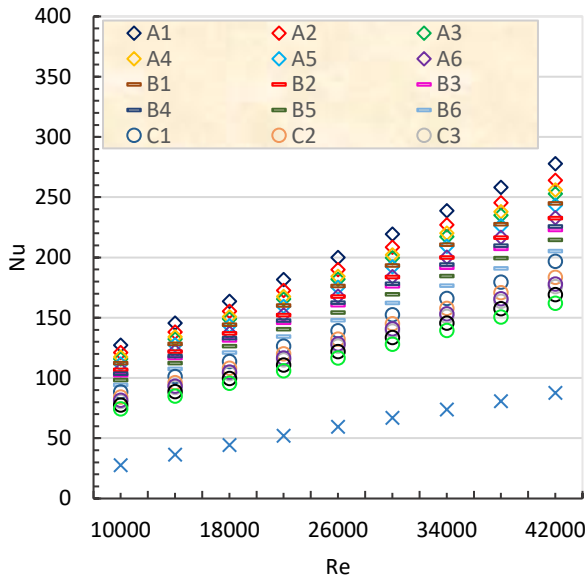
Şekil 4. Boş boru f değerlerinin ampirik bağıntılarla kıyaslanması

Şekil 3 ve 4'de bu çalışmadan elde edilen Nusselt sayısı ve sürtünme kayıp katsayısı değerlerinin,

denklemler (16)-(19) ile kıyaslanması gösterilmiştir. Kıyaslama sonucunda; deneysel verilerin, ampirik bağıntılarla (hem Nusselt sayısı  $Nu$ , hem de sürtünme kayıp katsayısı  $f$  için) aralarında yaklaşık  $\pm$  % 6 sapma olduğu görülmüştür.

Deneyler, sabit yüzey sıcaklığına, sahip eş eksenli bir ısı değiştiricisinde; delik çapının üç, türbülatorler arası mesafenin (adım) üç ve delik sayısının iki kere değiştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5’de ısı transferi verilerine ait grafik gösterim sunulmuştur. Silindirik bir borudaki türbülanslı akış durumuna ait olan bu grafik incelendiğinde ısı transferinde meydana gelen değişimler şu şekilde yorumlanabilir:



Şekil 5 Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

Bu grafikte; ısı transferinin Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere Reynolds sayısındaki artış ile beraber Nusselt sayısı yani ısı transferinde de önemli derecede artışlar meydana gelmiştir. A,B ve C durumlarının hepsinde de; adım sayısında ve çap değerlerinde meydana gelen artışlarla beraber ısı transferinde azalma gerçekleşmiştir. Yine bütün durumlar için; delik sayısının birden ikiye

çıkması ısı transferini olumsuz yönde etkilemiştir.

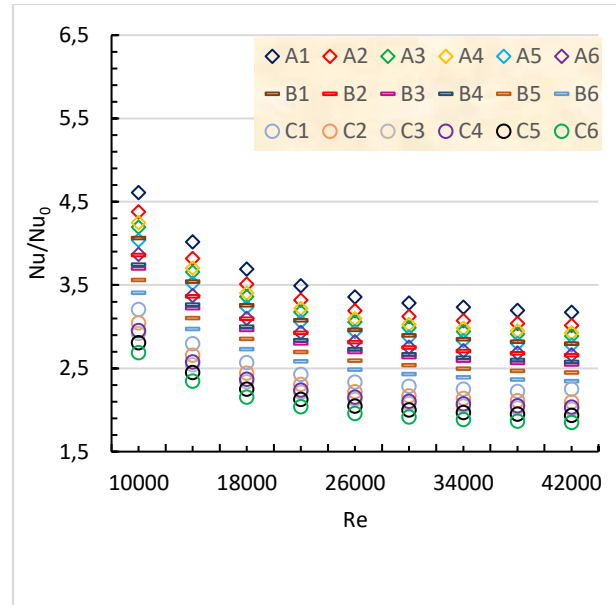
Isı transferindeki en büyük artış, parametrelerin A düzenindeki ald1ç1 seviyelerinde gerçekleşmiştir. Yani; adımın en az olduğu, delik sayısının 1 olduğu ve çapın da en küçük olduğu durumdur. Bu durumdaki artış oranları %460 ile %266 değerleri arasında elde edilmiştir.

Bütün artış oranları türbülatorlü durumun boş boruya göre kıyaslanmasıyla bulunmuştur.

B düzeninde ise ald1ç2 seviyelerinde en büyük artış oranı elde edilmiştir. A düzeninden daha düşük değerler bulunduğu bu düzenleme durumunda artış oranları %234 ile %406 arasında gerçekleşmiştir.

En düşük ısı transfer değerlerinin bulunduğu C düzenlemesinde; ald1ç3 seviyelerinde en büyük artış oranları hesaplanmış olup, bu düzenleme durumunda ısı transferindeki artış değerlerinin %185 ile %320 arasında değiştiği görülmüştür.

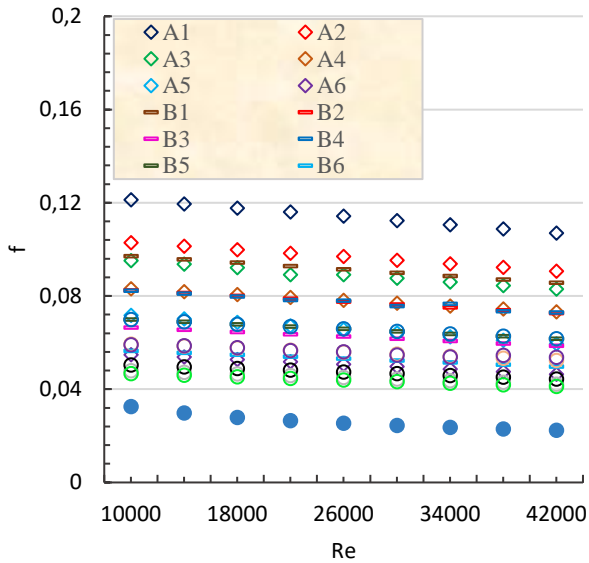
Şekil 6’da ise türbülator deneylerinden elde edilen  $Nu$  değerlerinin boş borudan elde edilen  $Nu$  değerlerine oranı sunulmuştur. Bu da boş boruya göre ısı transferinde meydana gelen artışı ifade etmektedir.



Şekil 6. Isı transfer oranlarının Reynolds sayısı ile değişimi

Bu grafikte,  $Nu$  oranlarının artan Reynolds sayısı ile birlikte düşüş eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu düşüş Reynolds sayısının 20000 değerine kadar daha belirgin olmakta, 20000 değerinden sonra ise oldukça azalmakta ve neredeyse doğrusal bir trend almaktadır. Özellikle, 10000-20000 arasındaki Reynolds sayısı değerlerinde bu orandaki düşüş eğilimi çok daha belirgin bir şekilde görülmektedir.

**A** parametresine ait 6 farklı deney düzenlemesi dikkate alındığında **A1-A6** arasında bulunan 6 farklı durum için ayrı ayrı hesaplanan en büyük değerler, Reynolds sayısının 10000 olduğu durumda yaklaşık olarak 4.61 ile 3.87 ve en düşük değerler ise Reynolds sayısının 42000 değerinde 3.17 ile 2.66 aralığında elde edilmiştir. Benzer şekilde; en büyük ve en küçük değerler **B** parametresi için sırasıyla 4 ile 3.41 ve 2.8 ile 2.35; **C** parametresi için en büyük ve en düşük değerler sırasıyla 3.2 ile 2.69 ve 2.25 ile 1.85 arasında değişmiştir.



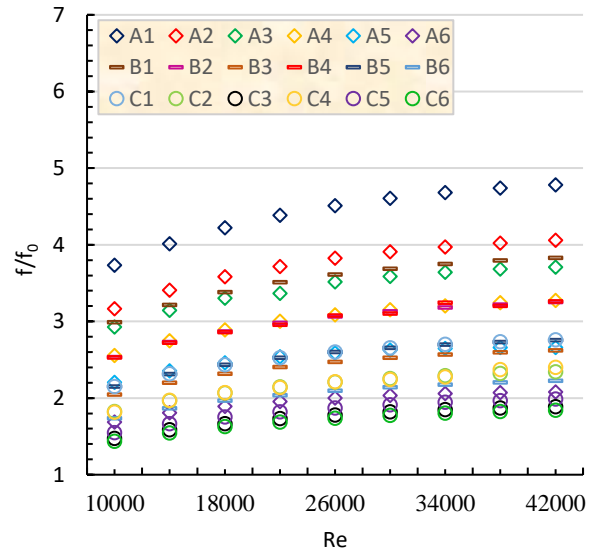
Şekil 7. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

Gerçekleştirilen deneylerde meydana gelen basınç düşüşlerinin incelendiği grafikler Şekil 7 ve 8'de verilmiştir. Şekil 7'de, basınç düşüşünde meydana gelen değişimler sürtünme kayıp katsayısı ( $f$ ) cinsinden incelenmiştir.

Isı transferinin aksine, artan Reynolds sayısı ile birlikte sürtünme kayıp katsayısında azalma meydana gelmektedir. Bu durum **A**, **B** ve **C** düzenleme durumlarının hepsi için geçerlidir.

Şekil 7 incelendiğinde, türbülator kullanmanın sürtünme kayıp katsayısında boş boru deney sonuçlarına göre önemli derecede artışlara neden olduğu görülmektedir. Isı transferi deney sonuçlarından farklı olarak en düşük Reynolds sayısı değerinde sürtünme kayıp katsayısı en büyük değerini almıştır. Denklem 3 incelendiğinde; sürtünme kayıp katsayısının hızın karesi ile ters orantılı olarak değişmesinin bunun sebebi olduğu açık bir şekilde görülmektedir. **A**, **B** ve **C** durumları için artış oranlarının sırasıyla; %478 - %168, %382 - %173 ve %275 - %143 aralığında olduğu görülmüştür.

$Nu$  ve  $f$  açısından incelendiğinde, en büyük artış oranları; delik sayısının tek, adım sayısı ve delik çapının en küçük olması durumunda elde edilmiştir.

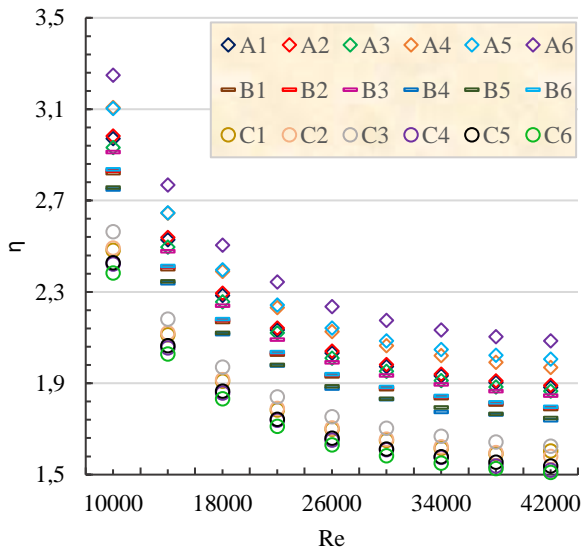


Şekil 8. Sürtünme faktörü oranlarının Reynolds sayısı ile değişimi

Şekil 8'de sunulan grafik, türbülator kullanımıyla meydana gelen basınç düşüşünün boş boruya oranlanmasıyla elde edilen artış oranlarını ifade etmektedir. Grafik

incelendiğinde artan Reynolds sayısı ile birlikte bu oranın da arttığı görülmektedir. **A** parametresi için; **A1-A6** arasında yapılan 6 deneyden elde edilen en büyük değerler Reynolds sayısının 42000 değerinde yaklaşık olarak 4.78 ile 2.07 arasında ve en düşük değerler ise Reynolds sayısının 10000 olması durumunda 3.73 ile 1.68 değerleri arasında elde edilmiştir. Benzer şekilde; en büyük ve en küçük değerler **B** parametresi için sırasıyla 3.82 ile 2.22 ve 2.98 ile 1.73; **C** parametresi için en büyük ve en düşük değerler sırasıyla 3.2 ile 2.69 ve 2.25 ile 1.85 arasında değişmiştir.

Şekil 9'da ise sistemin ısı performansını gösteren grafik bulunmaktadır. Bu grafik Denklem 15'ten de görüleceği üzere, Şekil 6 ve Şekil 8'den elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 9. Isıl performansın Reynolds sayısı ile değişimi

Isıl performans faktörü ( $\eta$ ); Nusselt sayıları ve sürtünme kayıp katsayılarının sabit pompalama gücü altında birlikte ele alınarak değerlendirilmesiyle hesaplanmıştır. Bu değerlendirme neticesinde, artan Reynolds sayısı ile birlikte bütün türbülantör düzenlemelerinde ısı performans faktörünün azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu eğilim Reynolds sayısının 26000 değerine kadar daha belirgin

olmakta, 26000 değerinden sonra ise neredeyse doğrusal bir hal almaktadır.

Isıl performans faktörü, hem Nu hem de f değerlerinin boş boruya göre artış miktarlarının oranını birlikte veren bir ifade olduğundan önemli bir değerlendirme kriteridir. Net bir enerji kazancından bahsedebilmek için bu değer 1'den büyük olması gerekmektedir. Gerçekleştirilen deneylerde bütün Reynolds değerlerinde ve türbülantör düzenlemelerinde ısı performans faktörünün 1'den büyük olduğu görülmektedir.

Isıl performans faktörü en büyük değerlerine **A** düzenleme durumlarında ulaşmıştır. Bu durumlarda elde edilen değerler 3.24 ile 1.88 arasında değişmektedir. Benzer şekilde **B** ve **C** durumları için hesaplanan en büyük ve en küçük değerlerin sırasıyla; 2.91 ile 1.74 ve 2.56 ile 1.50 arasında gerçekleştiği görülmüştür.

Bu sonuçlara göre enerji tasarrufu açısından en etkin düzenleme durumunun **A** durumu olduğu açıkça görülmektedir.

## Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, eş eksenli bir ısı değiştiricisine yerleştirilen dairesel kesitli türbülantörlerin ısı transferi, basınç kaybı ve ısı performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneyler türbülantlı akış durumu için Reynolds sayısının 10000 ile 42000 değerleri arasında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda;

1. Isı transferi açısından **A** düzenleme durumunun en iyi, **C** düzenleme durumunun ise en düşük sonuçları verdiği görülmüştür. **A** durumu için Nusselt sayısındaki artış boş boruya göre yaklaşık % 460 civarında olmuştur. Bu oran **B** durumunda %406, **C** durumunda ise %320 dolaylarında gerçekleşmiştir.
2. Sürtünme faktörü açısından en büyük artış oranları **A** düzenleme durumlarında, en düşük artış oranları ise **C** durumlarında elde edilmiştir. **A**, **B** ve **C** durumlarında boş boruya oranla



gerçekleşen en büyük artış oranlarının sırasıyla; %478, %382 ve %275 olduğu görülmüştür.

- Isıl performans hesaplanması ile hem ısı transferi hem de basınç kayıplarının birlikte değerlendirilmesi imkânı doğmaktadır. Bu tür çalışmalarda artan ısı transferi beraberinde sürtünme kayıplarını da getirdiğinden, böyle bir analizin yapılması son derece önem arz etmektedir. Bu çalışmada ısı performans faktörünün bütün durumlarda 1'den büyük olduğu görülmüştür. Adım sayısı, delik sayısı ve delik çapındaki artışların ısı performans faktörünü azalttığı tespit edilmiştir. Bütün türbülötörler arasında en büyük artışın 3.24, en düşük artış miktarının da 1.5 olduğu sonucu elde edilmiştir.

#### Kaynaklar

- Acir, A., Ata, İ., (2016). A study of heat transfer enhancement in a new solar air heater having circular type turbulators, *Journal of Energy Institute*, 89, 606-616.
- Acir, A., Ata, İ., (2016). Canlı, M.E., Investigation of effect of the circular ring turbulators on heat transfer augmentation and fluid flow characteristics of solar air heater, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 77, 45-54.
- Amro, M., Weigand, B., Poser, R., Schnieder, M., (2007). An experimental investigation of the heat transfer in a ribbed triangular cooling channel, *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 491-500.
- Eiamsa-ard, S., Promvonge, P., (2010). Thermal characteristics in round tube fitted with serrated twisted tape, *Applied Thermal Engineering*, 30, 1673-1682.
- Eiamsa-ard, S., Konkaitpaiboon, V., Nanan, K., (2013). Thermohydraulics of turbulent flow through heat exchanger tubes fitted with circular-rings and twisted tapes, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 21, 585-593.
- Etghani, M.M., Baboli, S.A.H., (2017). Numerical investigation and optimization of heat transfer and exergy loss in Shell and helical tube heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, 121, 294-301.
- Güneş, S., Özceyhan, V., Büyükalaca, O., (2010). Heat transfer enhancement in a tube with equilateral triangle cross sectioned coiled wire inserts, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34, 684-691.
- Kongkaipaiboon, V., Nanan, K., Eiamsa-ard, S., (2010). Experimental investigation of heat transfer and turbulent flow friction in a tube fitted with perforated conical-rings, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, 560-567.
- Mashoofi, N., Pesteei, S.M., Moosavi, A., Dizaji, H.S., (2017). Fabrication method and thermal-frictional behavior of a tube-in-tube helically coiled heat exchanger which contains turbulator, *Applied Thermal Engineering*, 111, 1008-1015.
- Özceyhan, V.; Güneş, S., Büyükalaca, O., Altuntop, N., (2008). Heat transfer enhancement in a tube using circular cross sectional rings separated from Wall, *Applied Energy*, 85, 988-1001.
- Promvonge, P., Koolnapadol, N., Pimsan, M., Thianpong, C., (2014). Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings, *Applied Thermal Engineering*, 62, 285-292.
- Qi, Z., Chen, J., Chen, Z., (2007). Parametric study on the performance of a heat exchanger with corrugated louvered fins, *Applied Thermal Engineering*, 27, 539-544.
- Royds, R., (1921). Heat transmission by Radiation. Conduction and Convection, *First Edition Company*, London, 191-201.
- Saha, S.K., Dutta, A., Dhal, S.K., (2001). Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 4211-4223.
- Saraç, B.A., Bali, T., An experimental study on heat transfer and pressure drop characteristics of decaying swirl flow through a circular pipe with a vortex generator, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 2007, pp. 158-165.
- Şahin, B., Demir, A., (2008). Performance analysis of a heat exchanger having perforated square fins, *Applied Thermal Engineering* 28, 621-632.
- Tandıroğlu, A., Ayhan, T., Energy dissipation analysis of transient heat transfer for turbulent flow in a circular tube with baffle inserts, *Applied Thermal Engineering*, 26, 2006, pp.178-185.
- Yakut, K., Şahin, B., Çelik, C., Alemdaroğlu, N., Kurnuç, A., (2005). Effects of tapes with double-sided delta winglets on heat and vortex characteristics, *Applied Energy* 80, 77-95.

## Investigation of the thermal performance of circular cross-sectional turbulence generators

### Extended abstract

Rapid depletion of fossil energy sources is one of the most important problems of the 21st century. Reasons such as energy demand caused by the increasing population and external dependence on energy have led scientists to design systems that are more efficient. The heat exchangers, which are the subject of this study, have a very wide usage area in both heating and cooling areas, houses and industry.

One of the methods used to increase heat transfer in heat exchangers is to use a turbulator. Increases in heat transfer are achieved with the use of turbulators. Thus, more efficient systems can be designed. However, the increase in heat transfer causes increase in pressure losses. For this reason, it is necessary to conduct the analyses by evaluating the increases in both heat transfer and pressure losses. In this study, heat transfer and pressure loss were evaluated together.

There are many researches to increase the heat transfer by changing turbulator geometries. The purpose of these researchers; In addition to increasing the heat transfer, it is aimed to prevent the increase in pressure losses and to develop more effective systems. In addition, the designed turbulators to be easily removed and installed in heat exchangers is one of the parameters to be considered.

In this study, a coaxial and parallel flow heat exchanger is used. The heat transfer, pressure loss and thermal performance of the designed turbulators were investigated. A steam boiler was produced for the experiment. The steam supplied from this boiler was sent to the space between the inner and outer pipe of the heat exchanger. Thus, constant temperature conditions were obtained on the outer surface of the inner tube. The air required for the experiments is provided with a fan.

In order to carry out the experiments, turbulators with circular cross sections were designed and these turbulators were placed in the inner pipe of the heat exchanger at intervals of 5, 10 and 15 cm. The number of holes on the turbulators was determined as 1 and 2 and the hole diameters were chosen as 0.5, 1

and 1.5 cm. The experiments were carried out between 10000 and 42000 Reynolds number. distance between the turbulators. In case A, the smallest value of the hole diameter (0.5 cm) was kept constant and other parameters changed. In the same way, the second value of the hole diameter (1 cm) was kept constant in the B state, and in the case of C, the third and maximum values of the hole diameter (1.5 cm) were kept constant and analyzes were made by changing the other parameters.

As a result of the experimental study, it has been observed that the state of A has the best results in terms of heat transfer. In the case of C, the lowest results were obtained. The highest rates of increase in cases A, B and C were 460%, 406% and 320%, respectively.

The highest rates of increase in friction factor were found in cases A and the lowest rate of increase in C cases. In the cases of A, B and C, the highest increase rates compared to the empty pipe were found as 478%, 382% and 275%, respectively.

The thermal performance factor value obtained by dividing the rate of increase in heat transfer by the increase in pressure loss is a very effective criterion for evaluation. In all experiments, thermal performance values were found to be greater than 1. As a result of the analysis, it has been shown that the thermal performance factor has the highest value of 3.24 and the lowest value of 1.5.

**Keywords:** Heat exchanger, heat transfer, friction factor, performance analysis



## Stability analysis of medium sized power plants subjected to grid events

Levent Kılıç<sup>1\*</sup>, Ayşen Basa Arsoy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş., R&D, ORCID: 0000-0002-9329-7418

<sup>2</sup> Kocaeli University, Department of Electrical Engineering, ORCID: 0000-0002-5729-0366

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 12.03.2019  
Received in revised form  
16.09.2019  
Accepted 27.01.2020  
Available online 15.06.2020

#### Keywords:

*Stability analysis, power plants, distribution grid, gas engine, gas turbine, grid events*

### ABSTRACT

Connection of small generating units in the medium voltage distribution system is increasing substantially. Such units, called distributed generation, can have a significant impact on, load flow, shortcircuit, voltage, frequency, power quality, stability, islanding and synchronized running, protection and reliability. In this study, the stability impact of a private sector power plant in Thrace region having synchronous generators driven by gas engine and gas turbine has been investigated in terms of fault ride through capability. Critical clearing time has been determined, once the criteria of fault ride through capability were explored. Grid operators do limit penetration levels of such plants and can also disconnect available units when grid fails. Stability is affected by voltage dip much worsely than penetration levels. It has been seen that the disconnection of power plants is not necessary, when the voltage dip restricted to 0,5 pu. Also that the stability is positively affected when the power factor is decreased to 0,8 from 1,0. The results also show that even 100% penetrated synchronous generator based power plants in distribution system do not affect stability badly in steady state operation.

Doi: 10.24012/dumf.538534

\* Corresponding author  
Levent Kılıç  
✉ [lkilic@sisecam.com](mailto:lkilic@sisecam.com)

## Introduction

Today's power systems are undergoing major changes. The penetration of generating units at the medium voltage grids are increasing in numbers. Such generation units (also called distributed generation, DG) can have a significant impact on some parameters such as voltage profile, power quality, reliability, frequency, etc. Because of their increasing penetration, the effect of these units cannot be neglected anymore. Some studies are also available for renewables on this subject.

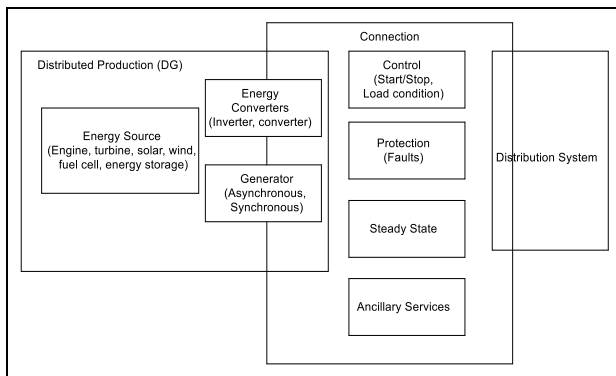


Fig. 1. Sources and events at the connection point

The increase of the power plants, together with new opportunities for power systems, also causes some problems to occur. Simulation studies on the grid voltage profile and short circuit effects of the DG stations connected to different locations of the radial distribution system have been carried out. DG will be a positive contribution to the voltage profile of the power plants connection, it will cause short circuit currents in the busbar that it is connected to, it can cause the healthy line to be disabled before opening the fault condition, DG will be not in one direction system with the power plants. It is stated that protection situations should be revised accordingly [1-7].

Recently, it has been stated that renewable energy and high efficiency systems are spurring efforts to generate electricity, that generators are connected to the system at the distribution level and are called distributed production, and that various researches carried out by the industry and the academy show that DGs will adversely affect the main distribution system in some ways. One of them is the determination of transient stability. Transient stability is generally not a problem because of the passive nature of the distribution grids, but it seems to have become more important recently with the increasing

participation of the DG. The critical clearing time (CCT) for DG have been determined for the existing Denmark 10 kV distribution grid [8]. Three phase faults at different grid points have been analyzed. Such critical opening time is determined by the DG becoming unstable. The results obtained from the situation scenario are presented and evaluated. The overall conclusion is that DG can create transient stability problems at the distribution grid level. Therefore, this situation must be taken into account when connecting new DG to the grid. The lower voltage protection settings can also be determined based on the transient stability analysis. This is important to ensure that some types of DG units can remain connected to the grid during and after a fault.

Another issue that investigated the effects of generator parameters on the stability of the power system. Simulation studies on generator system model, excitation system, and power system stabilizer parameters on power system transients and dynamic stability have been carried out [9]. The degree of stability of the power system depends on the accuracy and suitability of the values of the components making up the system. It is the most important task to check and test the correctness of the generator parameters before starting the power system stability studies. If only one of the parameters is faulty, the result will not reflect the actual condition. However, it is not possible and economically feasible to test all the parameters of all generators very tightly. A model proposed to overcome this problem is proposed.

Traditional distribution grid protection systems are fast enough to clean the fault in the passive distribution grid. However, when a synchronous generator DG is connected, the time required for the protection system to detect and open the fault can exceed the DG's stability limits, so the DG has to leave without exceeding the limits of stability. According to some technical standards, for instant [10], the DG should be automatically disconnected in the event of an error or an abnormal condition. This prevents damage to the DG and prevents it from interfering with the protection system [11]. Due to the increasing prevalence of DG, it is no longer desirable to leave DG without unnecessary. This situation should be avoided as it reduces the expected benefits of DG [12].

Stability of DG units: When applied to failure criteria, DG units connected to the distribution grid must be able to withstand the voltage drops occurring after the failure without losing their stability within the specified limits. The existing protection systems are relatively inexpensive and simple, and they are designed according to the structure of the non-DG distribution grid. The fault clearance time may exceed the stability limits of locally connected DG units, especially for faults close to the transformer center. Thus, keeping DG units connected to the distribution grid protected by the traditional protection system can lead to instability of the DG units that are connected when the post-failure criterion is applied.

In this study, the answers to the following questions will be tried to be answered via the actual field / circuit parameters and DigSilent program.

- What would be the effect of the DG being connected during or after a distribution grid fault?
- Can a DG depend on the distribution system, either during or after a distribution grid fault, adhered to without losing its stability?
- What kind of fault leads to the disconnection of the DG depending on the distribution grid?
- What is the criterion to remain active after minimum breakdown to prevent DG from being disabled?
- How does the situation change at various DG participation rates?

### Investigation of the grid events

The load flow is used to detect the state of the system for a given load and production [Table 1]. This corresponds to a decisive situation. In reality, however, this will vary with opening and closing, loading and unloading of loads and production resources, and sequential or random cascade situations.

Table 1. Load parameters at busbar

Busbar	P	Q	V	$\delta$	Explanation
Load	√	√			General load
Generator or Synchronous Condansator	√		√ (while $Q < Q_c < Q^+$ )		Generator or Synchronous Condansator (P=0) $Q^-$ = Minimum VAR limit $Q^+$ = Maximum VAR limit
	√	√ $Q_c < Q^-$ or $Q_c > Q^+$			V , under $Q_c$ limits
Swing			√	√	Swing busbar adjusts the net power in order to keep busbar voltage. (This is compulsory for solution)

Load flow, short circuit, stability, motor starts, harmonic operations are the basis of the work. Initial conditions for such studies are provided through the system data. [13]. Short-circuit tests are conducted to determine the magnitude of the current that flows through the power system when a fault occurs. The size of the current changes over time until it reaches a stable state. In order to analyze the stability of the distribution grid, it is necessary to examine the behavior of sudden load changes in the event of failure or the disengagement or entry of some system elements. The stability of the system is defined by its stability, against normal and defective conditions. For this reason, the distribution grid is subject to possible harmful transient events, such as load loss, loss of synchronization, etc. Figure 2. Stability, small signs (static) and short circuits from small changes around the equilibrium point, transient state or angular stability with large amplitude faults such as sudden loss of production, dynamic stability such as voltage collapses, and so on. conceivable. It is expected that DG will be able to withstand and support the voltage and frequency in the distribution grid under normal conditions and for a certain period of deterioration.

Steady state stability is that, after a minor failure or change of a system, it can return to its beginning or near state even if this change continues. Normal steady state stability is used in the technical and economic design of the system. Failure steady state stability is used in the analysis of the system response to the new situation and steady state stability after failure is used to examine the weaker system that will occur in case of the disconnection of one or more system elements.

Transient state stability is the ability to recover to the initial state of the system after major failures [8,14]. Knowing the nature of transient behavior will allow the identification of the correct responses and equipment. The transient steady

state simulating function takes into account the dynamics of electromechanical and control elements. The symmetrical, steady state of the passive mains is used, only the basic components of the voltages and currents are taken for.

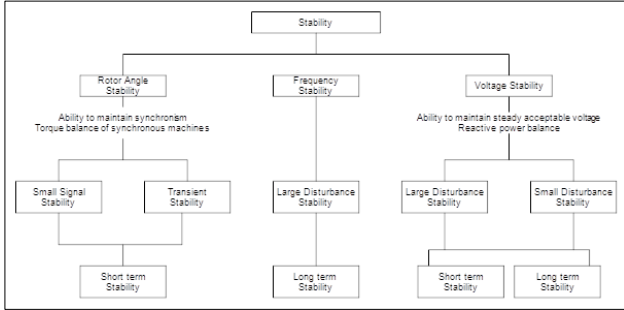


Fig. 2. Stability characterization

Transient states can be divided into three times domains, as seen in Figure 3 [15,16,17,18]:

- Short cycling or electromagnetic transient conditions
- Intermittent or electromechanical transients
- Long circulating transient situations

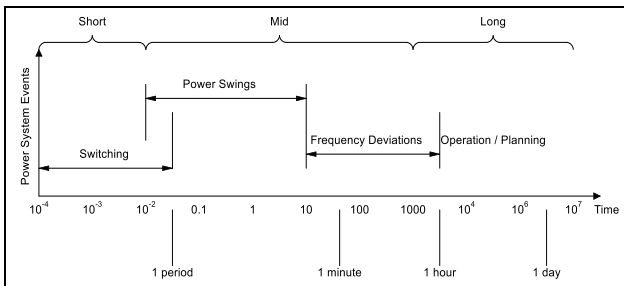


Fig. 3. Power system events and time characterization

In the event of a severe failure, the system values will deviate from their steady state values and will move to the new state. The stability in this new situation will be achieved by the acceptable of the busbar voltage and degree of rotation of generator rotor before openings of the failure. The generator rotor angle is usually used as a stability indicator. In the event of a fault, the bus voltages will decrease. The power given by the connected generators at the near point will also decrease. In this case, the mechanical power supplied by the engine may not be the same as the electrical power change. This constitutes the well-known oscillation equation given in Eq. (1) [19]:

$$\frac{2H}{w_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \tag{1}$$

Here;

$P_m$  : Mechanical power [pu]

$P_e$  : Electrical power [pu]

$H$  : Rotor inertia constant [MW.s/MVA]

$\delta$  : Rotor angle [rad]

$\omega_s$  : Angular frequency [rad/s]

$t$  : Time [s]

Equation 4 is obtained when the rotor angular velocity is defined as in Equation 2 and the generator electrical power is defined as in Equation 3.

$$w_r = \frac{d\delta}{dt} = w - w_s \tag{2}$$

$$P_e = P_{max} \sin \delta \tag{3}$$

$$\frac{2H}{w_s} \frac{dw_r}{dt} = P_m - P_{max} \sin \delta \tag{4}$$

After a number of mathematical operations applied to Equation 4, Equation 5 is obtained with the help of the power angle diagram [19].

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_{max} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_m - P_{max} \sin \delta) d\delta \tag{5}$$

The left part of the equation corresponds to the failure period and the right part corresponds to the post-failure situation. Where  $\delta_0$  represents the angle of the steady state, and  $\delta_{cr}$  represents the critical clearing angle. With the solution of Eq. (5), the critical clearing angle can be calculated.

$$\delta_{cr} = \cos^{-1}[(\pi - 2\delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0] \tag{6}$$

The fault clearing time specifies the recovery of the kinetic energy of the generator. If this time is too long, the stability limits of the generator will be exceeded and the generator will be in an unstable state. For the generator's transient state stability, the fault clearance time is an important quantity and the stability limit can be expressed as the critical clean-up time. In [18], the critical clearing time is defined as the time between the occurrence of the fault and the cleaning. The critical cleaning time is expressed in Equation (7):

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{w_s P_m}} \tag{7}$$

### DG behaviour against faults

The distribution grid may be suitable for expansion. It is important to examine the system according to various possible operating modes. Simplified single line diagrams are used for this. Single line diagram, grid, busbar, transformer, generator, load, capacitor, reactor, line, etc. Figure 4 shows an expanded single line diagram of the actual system of the distribution grid to be operated.

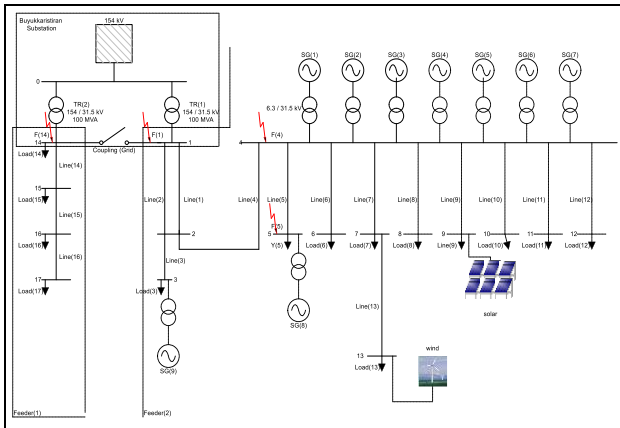


Fig. 4. Real grid and its model (data is available from [20])

In order to examine the effect of grid events on critical clearing time, a series of situation analysis was performed, such as the creation of a short circuit in any busbar in the system and the failure to terminate the other component. All working cases are summarized systematically in Table 2. Under these circumstances, various parameters such as rotor angle and generator active power were observed.

Table 2. Summary of study

Shortcircuit Point	Case Number	Feeder 2 Load [MW]	Detail	Subcase
Busbar 5	1	50	Generator nominal powers are changing	b
	2	50	cosφ = 0,98 for all SGs	b
Busbar 14	3	50	For SG1,2: cosφ = 0,8; for SG3: cosφ = 0,98	b
	4	100	Generator power are fixed, feeder loads are changing	b
Busbar 4	5	50	Generator power are fixed, feeder loads are changing	a,b,c
	6	10		b
Busbar 5	7	50	Busbar voltage is 0 pu at the shortcircuit time	b
	8	50	Busbar voltage is 0,5 pu at the shortcircuit time	b
	9	50	Busbar voltage is 0,6 pu at the shortcircuit time	b
	10	50	Busbar voltage is 0,7 pu at the shortcircuit time	b
	11	50	Busbar voltage is 0,8 pu at the shortcircuit time	b
	12	50	Busbar voltage is 0,9 pu at the shortcircuit time	b
Busbar 5	13	50	Generator cosφ = 0,98	b

Busbar 5	14	50	Generator cosφ = 0,8	b
	15	50	Generator cosφ = 0,7	b
	16	50	Generator cosφ = 0,6	b
	17	50	Generator cosφ = 0,5	b
Busbar 2	18	10	Line 4 is opened	b
	19	10	Line 4 is opened	b + wind
	20	10	Line 4 is closed	b + wind
Busbar 14	21	50	Busbar changing	b
	22	50	Busbar changing	b + wind
Busbar 5	23	50	Busbar changing. Transformer disconnection	b
	24	50	Busbar changing. Transformer disconnection	b + wind
Busbar 5	25	10	Line 4 is opened	b + solar
	26	10	Line 4 is opened	b + solar + wind
	27	10	Line 4 is closed	b + solar
	28	10	Line 4 is closed	b + solar + wind
Busbar 5	29	100	Generator power are fixed, feeder loads are changing	a,b,c
	30	50		
	31	10		
Busbar 5	32	50	Busbar voltage is 0,5 pu at the shortcircuit time	c
Busbar 5	33	10	Line 4 is opened	c + wind
Busbar 5	34	10	Line 4 is closed	c + wind
Busbar 5	35	10	Line 4 is opened, and Line 7 is closed	c + wind + solar

### Cases 1 and 2 analyse

In case 1, it will be given in detail in order to see the system being watched. The results obtained in other studies are given [20]. In this case, the load-2 has a load of 50 MW. Loads and synchronous generators are identical and SG1, SG2 and SG3 are active. Short circuits were made in busbar 5 and the situation analyzes were repeated for different opening times. Critical clearing times and states are realized and the generator active power and rotor angle changes for each case are achieved. If the fault is terminated within 240 ms, the rotor angle does not reach 90 degrees, it can go back to stable state even at 90 degrees at 360 ms, and if it is terminated after 360 ms, the steady state seems to have deteriorated.

In this case, shortcircuited busbar 14 was selected as busbar, and the fault was created in second. As in Case 1, the loader and synchronous generators are identical and have three generators (SG1, SG2 and SG3) with a cosφ of 0.98. The analyzes were repeated for different clearing times.

### Cases 3-35

The results of examining all cases in Table 3. In addition, the generator angle change versus different trip times for selected conditions is given in Figures 5-10.

Table 3. Critical clearing times for cases of 7-12

Case	Busbar voltage [pu] at the shortcircuit time	Shortcircuit Resistance [Ω]	CCT [ms]	
			Case for 90° Angle	Unstable
Case 7	0	0	240	355
Case 8	0,5	0,65	1340	1600
Case 9	0,6	0,90	2600	3200
Case 10	0,7	1,20	4700	5900
Case 11	0,8	1,65	13000	14900
Case 12	0,9	3,00	53500	55000

Table 4. Critical clearing times for cases of 13-35

Case	CCT [ms]	
	Case for 90° Angle	Unstable
Case 13	240	355
Case 14	320	380
Case 15	320	390
Case 16	320	401
Case 17	320	412
Case 18	215	260
Case 19	80	83
Case 21	300	342
Case 22	300	341
Case 23	300	344
Case 24	300	343
Case 25	120	168
Case 26	50	60
Case 27	300	355
Case 28	300	353
Case 29 b	244	358
Case 30 b	238	354
Case 31 b	232	354
Case 32	300	600
Case 33	80	83
Case 34	300	351
Case 35	300	352

It is seen that limiting the voltage level above 0.5 pu is the most important parameter in stability evaluation. As the value of pu increases, the effect on stability becomes exponential. Short circuit resistors represent short circuit states at certain points in the lines.

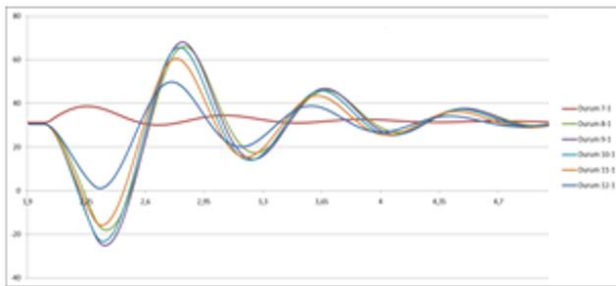


Fig. 5. Generator rotor angles for cases 7-12

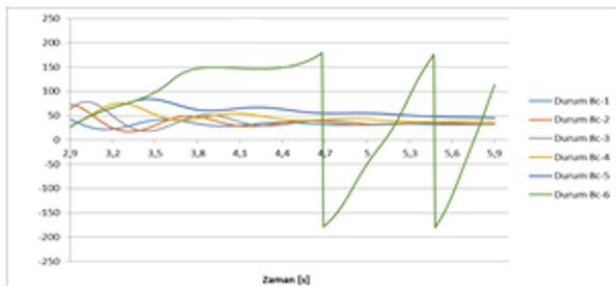


Fig. 6. Generator rotor angles for case 8

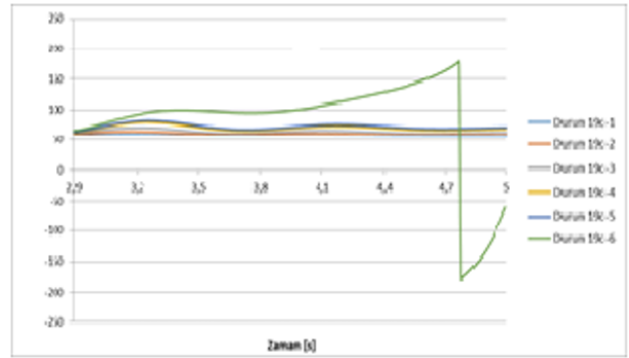


Fig. 7. Generator rotor angles for case 19c

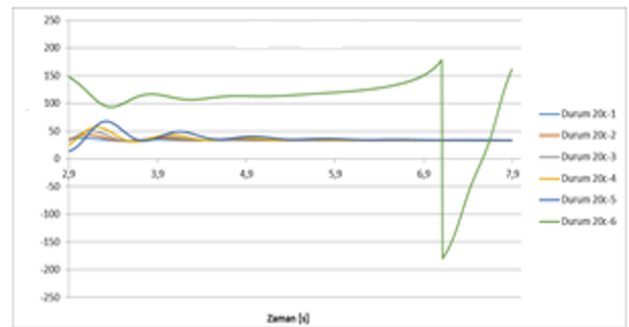


Fig. 8. Generator rotor angles for case 20c

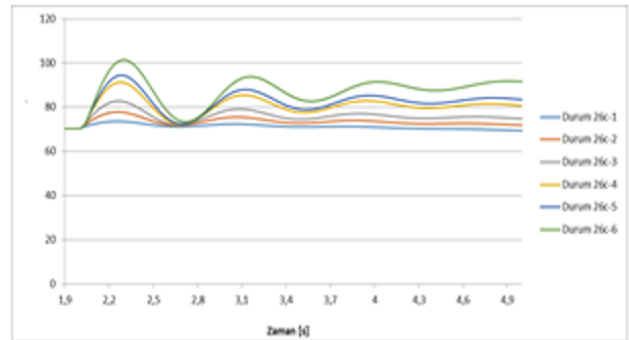


Fig. 9. Generator rotor angles for case 26c

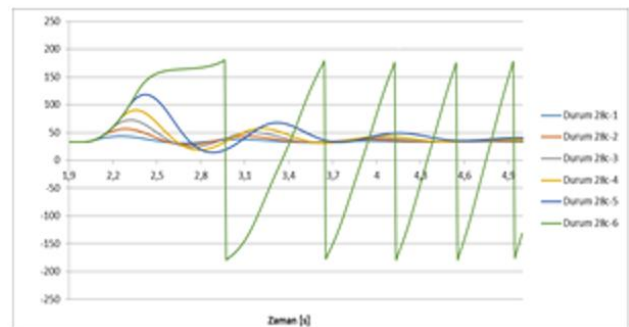


Fig. 10. Generator rotor angles for case 28c

The results from the simulations are summarized below:

- It is determined that the critical clearing time (CCT) of the DG connected to the conventional grid structure is low (230 ms). This



situation is important for protection systems. If relay coordination is done considering this period, synchronous generators can be kept in operation.

- If the power factor is pulled from 1.0 to 0.8, then the CCT is increased to 320 ms and if the power factor is lowered, the CCT is not changed.
- At some points of failure in the distribution grid and at the power plants' side, the fault clearing time can exceed the critical clearing time of the DG's itself and this causes the DG engines to work erratically.
- In the case of severe transients, it is observed that the transient state stability of the critical systems is impaired when the DG are synchronized.
- The criterion for remaining in the distribution grid after a fault depends on the balance between the load and the production for a stable power system. To avoid the unbalance between the load and the production, the DG power plant has to remain connected to the grid during and after a grid failure. This can be achieved by voltage and frequency support. Due to the different sensitivities of the systems to the failure, it is seen that after the critical clearing time, the DG engines cannot meet this. Since the enable is directly related to the voltage drop, the greater the voltage drop can be held at 0.5 pu, the better the prevention of power plants deactivation.
- It is determined that when the voltage drop after short circuit is limited to 0,5 pu, the CCT reaches to 1340 ms and in this case the synchronous generators maintain their stability after failure.
- It has been observed that engine / turbine time in the same characteristics connection and load condition have no significant effect on critical clearing.
- Under normal operating conditions, SG participation in the distribution

system has been observed to increase by up to 100%.

- One or more units in the distribution grid structure and the wind power plant and solar power plant conditions integrated into them have been examined for different load conditions for normal operation, island mode operation and fault conditions.
- It has been observed that wind and solar power plants do not have any adverse effects on the engine/turbine DG when connected to the grid and that wind and solar connections have no significant short circuit effect in the grid, but that these connections deteriorate in the case of island mode operation.
- At 10% - 50% - 100% DG participation rates, CCT was found to be 242 - 240 - 234 ms respectively. The effect of participation rate on CCT is very small.
- It has been determined that in the transient state the rotor angle is released to the unstable zone in the elapsed time of the trip.

## Conclusions

In this study, various failures, different operating situations and transient state behaviors under different production-consumption conditions and their effects on stability were examined at certain points of the distribution grid to which a special SG-based power plant rated as DG was connected.

First, the grid events to dismantle the DG stations have been compared with other countries. Subsequently, distributed production systems have been evaluated for stability, frequency control and reliability, and the current standards for this issue have been summarized.

The production units of the exchanged plant and the grid to which it was connected were modeled with DigSilent software and related analyzes were carried out. One or more units in the distribution grid structure and the wind and solar conditions integrated into them have been investigated by comparing them for normal operation, island mode operation and fault

conditions for different load conditions. The results obtained are as follows.

- The critical clearing time of synchronous generators at large amplitude voltage drops has been proven by simulations. Since the time required for the synchronous generators to remain in the circuit after the fault is low, the relay coordination at the exchange side and also at the grid connection point is important. The line voltage statistics and classification will allow to determine the appropriate setting values.
- It has been seen that the time exceeding the critical clearing time causes the uncertainty of the synchronous generators left on the circuit itself and the grid to which it is connected.
- It has been determined that increasing the participation rate of synchronous generators to be connected to the grid in normal working conditions will contribute positively to voltage and frequency control and reliability.
- It is not necessary to deactivate the synchronous generators in case of short term occurrence at the far points.
- It has been observed that engine / turbine connection and load condition have no significant effect on critical clearing time in the same characteristics.

## References

1. Schavemaker P.H., Van der Sluis L., *Electrical Power System Essentials*, Wiley&Sons, Chichester, United Kingdom, 2008.
2. Reza M., Stability analysis of transmission systems with high penetration of distributed generation. Ph.D. Thesis, Technische universiteit Delft, 2006.
3. Ackermann T., Knyazkin V., Interaction between distributed generation and the distribution grid: Operation aspects, IEEE Transmission and distribution conference and exhibition Asia Pacific, 2002, Yokohama.
19. Grainger J. J., Stevenson W.D., *Power System Analysis*, 1994, McGraw-Hill.
4. Ishchenko A., Myrzik J.M.A., Kling W.L., Dynamic equivalencing of distribution grids with dispersed generation using hankel norm approximation, *IET Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, 2007, 1(5), 818-825.
5. Nuroglu F. M., Arsoy A. B., Voltage Profile and Short Circuit Analysis in Distribution Systems with DG, Electric Power and Energy Conference, 2008, Canada.
6. Thong V. V., Vermeyen P., Driesen J., Belmans R., *Grid Connection Aspects of Distributed Generation*, *International Energy Journal*, 2005, 6(1), 148-161.
7. Walling R.A. (Reigh), Saint R., Dugan R. C., Burke J., Kojovic L., A. Summary of Distributed Resources Impact on Power Delivery Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(3), 1636-1644.
8. Xyngi I., Ishchenko A., Popov M., Sluis L. V. D., Transient Stability Analysis of a Distribution Grid With Distributed Generation, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(2), 1102-1104.
9. Sun X., Chen D., Gao M., Liu D., Zhu T., Generator Parameters' Impact on Power System Stability and Their Engineering Testing Methods, *Electrical Power Systems and Computers*, 2011, 99, 259-276.
10. IEEE 1547, IEEE Standard for interconnecting distributed resources with electrical power systems, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003, New York.
11. Mozina C. J., Distributed generator interconnect protection practices, IEEE Power Engineering Society Power System Conference and Exposition, 2006, Dallas.
12. Driesen J., Belmans R., Distributed generation: Challenges and possible solutions, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006, Montreal.
13. DigSilent Power Factory Manual, Version 13.2, 2007, Germany.
14. IEEE Committee report, Proposed terms and definitions for power system stability, in *IEEE transactions PAS*, 1982, 1894-1898.
15. Venikov V., *Transient Processes in Electrical Power Systems*, Mir, 1980, Moscow.
16. Peterson H. A., *Transients in Power Systems*, John Wiley & Sons, 1951, New York.
17. Greenwood A., *Electrical Transients in Power Systems*, John Wiley & Sons, 1991, New York.
18. Pavella M., Murthy P. G., *Transient Stability of Power Systems*, John Wiley & Sons, 1994, West Sussex.
20. Kılıç L., Determination of transient stability criteria for private sector power plant located at Thrace region, PhD Thesis, Kocaeli University, 2015.



# Android İşletim Sisteminde Kötücül Yazılım Tespit Sistemleri

**Abdullah DAĞLIOĞLU\***

Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü Bilgisayar Bilimleri, Ankara

[abdullah.daglioglu@gazi.edu.tr](mailto:abdullah.daglioglu@gazi.edu.tr) ORCID: 0000-0002-0949-0160, Tel: (90) 555 704 07 83cihaz

**İbrahim Alper DOĞRU**

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara

[iadogru@gazi.edu.tr](mailto:iadogru@gazi.edu.tr) ORCID: 0000-0001-9324-7157

Geliş: 30.04.2019, Revizyon: 22.08.2019, Kabul Tarihi: 05.09.2019

## Öz

Günümüzde bilgisayarların erişilemez olduğu durumlarda mobil cihazlar bilgiye erişmek için önemli bir araç haline gelmiştir. Akıllı mobil cihazlar birçok farklı alanda farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Sosyal ağlar gibi internete sürekli bağlılık gerektiren uygulamalarda önemli bir büyüme olduğundan bu durum internet trafiğini olumsuz etkilemiştir ve potansiyel ağ tıkanıklığına neden olmuştur. Bu popülerlik akıllı mobil cihazları kötücül yazılımların hedefi haline getirmiştir. Statista firmasının 2018'in ikinci çeyreğinde yapmış olduğu araştırmaya göre 2009 yılı ile 2018 yılları arasında dünya çapında satılan akıllı telefonların %88'i Android işletim sistemine sahip cihazlardır (Statista, 2018). Android, Google tarafından geliştirilen Linux tabanlı açık kaynak bir işletim sistemidir. Android izin tabanlı bir güvenlik mekanizmasına sahiptir. Android işletim sisteminin izin tabanlı güvenlik mekanizmasına sahip olması ve Google tarafından yeterli bir güvenlik taramasının olmaması bu işletim sistemini kötücül yazılım geliştiricilerin hedefi haline getirmiştir. Kötücül yazılımları tespit ederek kullanıcıları kötücül yazılımlardan korumak amacıyla literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, Android yazılım mimarisi hakkında temel bilgilere yer verildikten sonra Android işletim sisteminde kötücül yazılım tespit ve koruma yöntemlerinden bahsedilip ardından literatürde yer alan çalışmalar incelenerek yapılan çalışmaların başarımları değerlendirilmiştir. İncelenen çalışmalar arasında kötücül yazılım tespitinde en yüksek başarı oranına sahip olan çalışmanın %98,32 ile Wang ve diğerleri (2015) tarafından hibrid analiz yöntemi kullanılarak geliştirilen sisteme ait olduğu gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Android İşletim Sistemi, Android izin, kötü niyetli yazılım tespiti, uygulama güvenliği, mobil cihazlar, akıllı cihaz

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Günümüzde akıllı mobil cihazların gelişimiyle bilgiye her yerden erişmek oldukça kolay hale gelmiştir. Bu durum insanlar arasında akıllı telefon kullanım oranını oldukça arttırmıştır. Mobil cihazların artmasıyla kullanıcılar bu cihazları kişisel iletişim, veri depolama, multimedya, gerekli bilgiye ulaşma ve eğlence gibi çeşitli amaçlarla kullanmaktadırlar. Mobil cihazların bu kadar çeşitli sektörde kullanımı sebebiyle hem internet trafiği hem de mobil kötücül yazılımların sayısı artmıştır. Statista firmasının 2018'in ikinci çeyreğinde yapmış olduğu araştırmaya göre 2009 ile 2018 yılları arasında dünya çapında satılan akıllı telefonların %88'i Android işletim sistemine sahiptir (Statista, 2018). International Data Corporation (IDC) firmasının Eylül 2018 raporunda 2019 yılında akıllı telefon kullanım oranının 2018 yılına göre %3,7 artacağı belirtilmektedir (IDC, 2018). Statista istatistik firmasının 2018'de yapmış olduğu araştırmaya göre Google Play Store'deki uygulama sayısı 2.6 milyonun üzerindedir (Statista, 2018).

Android, Google tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu ve Linux tabanlı bir mobil işletim sistemidir. F-Secure güvenlik firmasının F-Secure Siber Güvenlik Durumu 2017 raporuna göre mobil kötücül saldırıların %99'undan fazlası Android cihazları hedeflemektedir (F-Secure, 2017). Aynı raporda Android'in açık kaynak bir işletim sistemi olmasından dolayı özellikle Android cihazları hedefleyen 19 milyondan fazla kötücül yazılımın geliştirildiği belirtilmektedir (F-Secure, 2017). G Data firmasının Eylül 2018 raporuna göre 2018'in ilk çeyreğinde yapılan çalışmada 846916 yeni kötücül yazılım tespit edilmiştir (G Data, 2018). Bu araştırmaya göre 2017'nin ilk çeyreğine oranla 2018'in ilk çeyreğinde kötücül yazılımın %12 oranında arttığı gözlenmiştir (G Data, 2018). Ayrıca bu rapora göre her gün ortalama 9411 kötücül yazılım tespit edilmektedir (G Data, 2018). Android mobil kötücül yazılımlar, kullanıcılar adına yetkisiz işlem yapmak

(malware) ve kullanıcıların kişisel verilerini bilgi amaçlı toplamak (grayware) üzere iki temel amaca sahiptirler. Android İşletim Sistemi'nin açık kaynak kodlu olması, Android cihazların kullanım oranının diğer cihazlara oranla fazla olması, Android'in izin tabanlı güvenlik mekanizmasına sahip olması, resmi dağıtım kanalı olan Google Play Store'de yeteri kadar güvenlik taraması olmaması ve SlideMe-PandaApp gibi üçüncü parti uygulama dağıtım kanallarından uygulamaların dağıtılabiliyor olması Android mobil kötücül yazılımların artma sebepleri olarak gösterilebilir. İzinler, uygulamaların cihazın veya kullanıcının çeşitli kaynaklarını kullanmak amacıyla ihtiyaç duyduğu onaylardır. Android 6.0 Marshmallow sürümünden önce kullanıcılar uygulamaları yüklerken uygulamaların kullandığı izinler Android tarafından kullanıcılara listelenmekteydi ve uygulamaların kurulması için kullanıcının bu izinleri onaylayarak kuruluma devam etmesi beklenmekteydi. Kullanıcı kendi cihazının güvenliğini kontrol edememekteydi. Bu durum kullanıcıya izinleri kabul edip uygulamayı kurma ya da kabul etmeyip kurulumu iptal etme seçeneklerini sunmaktaydı. Bununla birlikte Google son zamanlarda kullanıcı güvenliği için birtakım çalışmalar yapmıştır. Bunların başında Android 6.0 Marshmallow sürümüyle artık uygulamaların kullandığı izinlerin kontrolünün tamamen kullanıcının inisiyatifine bırakılması gelmektedir. Böylece kullanıcının güvenli görmediği izinleri, uygulamanın kullanımına kapatmasına rağmen uygulamayı cihazına kurabilmesi sağlanmıştır.

Android mobil kötücül yazılım türünün çok çeşitli olmasından dolayı kullanıcılara uygulamaların güvenilirliği hakkında bilgi vermek ve uygulamaları kötücül yazılımlardan korumak için kötücül yazılım tespitine ihtiyaç duyulmuştur. Literatürde bu amaçla çeşitli analiz teknikleri bulunmaktadır. Bu makalede literatürde yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilecektir. Bu makalenin 2. bölümünde Android yazılım mimarisi hakkında temel

bilgilere, 3. bölümde Android Kötücül Yazılım Tespit ve Koruma Yöntemlerine, 4. bölümde yapılan çalışmaların yeteneklerinin karşılaştırılmasına, 5. ve son bölümde ise sonuçlar ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

## Android Yazılım Mimarisi

Android'in yazılım mimarisi 5 katmandan meydana gelir (Android System Architecture, 2011). Android sistem mimarisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu katmanları açıklamak gerekirse:

### Linux Çekirdek (Linux Kernel)

Donanıma ait tüm bilgiler ile Android uygulamaların çalışmasını sağlayan ses, klavye, WI-FI, güç denetimi, işlem ve hafıza denetimi gibi sürücülerin bulunduğu en alt katmandır.

### Kütüphaneler (Libraries)

Çekirdeğin üstünde bulunan ve genellikle C++ ve C dilleri ile yazılmış SQLite, SSL, FreeType gibi kütüphanelerin yanı sıra sistem kütüphanelerini içeren katmandır.

### Android Çalışma Zamanı (Android Runtime)

Android çalışma zamanı, Android mimarisinin üçüncü bölümüdür ve alttan üçüncü bölümde bulunmaktadır. Bu bölüm Dalvik Sanal Makinesi denilen anahtar bir bileşen sağlamaktadır. Bunun yanı sıra bu katmanda Linux'un çekirdek kütüphaneleri bulunmaktadır.

#### a) Çekirdek Kütüphaneleri (Core Libraries)

Bunlar Java SE ve Java ME'den farklı kütüphanelerdir. Java'ya gerekli olan çekirdek API'ler, veri yapılar, hizmetler, dosya erişimler, ağ erişimler ve grafik bileşenlerinin yer aldığı kütüphanelerdir.

#### b) Dalvik Sanal Makinesi (Dalvik Virtual Machine - DVM)

Android işletim sisteminin en önemli bileşenidir ve mobil cihazlar için optimize edilmiş Android sanal makinedir. Modern JVM olarak da bilinir. Yüksek performans ve kusursuz bellek yönetimi

sağlamaktadır. Bir cihaz üzerinde birden fazla sanal makine oluşturulabilmektedir. Dalvik Sanal Makinesi cihazdaki düşük seviyeli işlemleri düzene sokmak ve performansı arttırmak için Linux işletim sisteminin çekirdeğinden faydalanmaktadır. Gömülü (embedded) sistemler için tasarlanan bu sistemde, Java derleyicisi ile .class dosyalarına dönüştürülen .java dosyaları Dex derleyicisi ile .dex dosyalarına dönüştürür. Dönüştürülen bu .dex dosyalar Dalvik Sanal Makinesi'nde çalıştırılmaktadır.

### Uygulama Çatısı (Application Framework)

Uygulama çatısı katmanı uygulamalara java classları şeklinde yüksek seviyeli servisler sağlamaktadır. Bu servisler;

#### a) Aktivite Yöneticisi (Activity Manager)

Projenin sahip olduğu aktivitelerin bütün yönlerini ve yaşam döngüsünü kontrol etmektedir.

#### b) Görünümler (Views)

Aktivitelerin kullanması gereken arayüzlerin tasarlanması için kullanılmaktadır.

#### c) Uyarı Yöneticisi (Notification Manager)

Uygulamada kullanılan bildirimler ve uyarıların doğru ve zamanında çalışmasını kontrol etmektedir.

#### d) İçerik Sağlayıcılar (Content Providers)

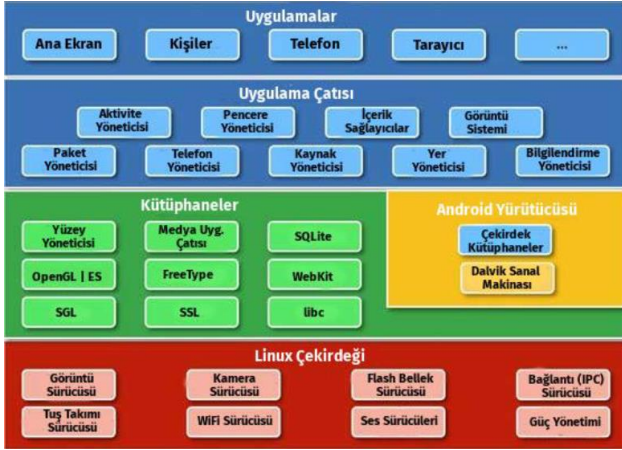
Uygulamaların başka uygulamalar ile veri alışverişini sağlamaktadır.

#### e) Kaynak Yöneticisi (Resource Manager)

Kod kullanılmayan gömülü kaynaklara erişimi sağlamaktadır. Bu kaynaklar grafik ayarı ve kullanıcı arayüzü düzenleri olabilir.

### Uygulamalar (Applications)

Android uygulama çatısının en üst kısmında yer alan katmandır. Sınıflar ve servisleri kullanan rehber, ayarlar, oyunlar vb. ana uygulamaların tümünün bulunduğu katmandır. Ayrıca bu katman yerel kütüphaneleri ve Linux çekirdeğini kullanmaktadır.



Şekil 1. Android sistem mimarisi (Android System Architecture, 2011)

## Android Kötü Niyetli Yazılımların Tespiti ve Koruma Yöntemleri

Android işletim sisteminin kullanımının artmasıyla Android mobil kötü amaçlı yazılımlar da artmıştır. Bu artış mobil kötü amaçlı yazılım çeşitliliğini artırmıştır. Mobil kötü amaçlı yazılım çeşitliliği araştırmacıları ve kullanıcıları kötü amaçlı yazılım tespit ve koruma yöntemleri araştırmasına yöneltmiştir. Bu bölümde mobil kötü amaçlı yazılım tespitinde kullanılan teknikler ve koruma yöntemleri incelenecektir.

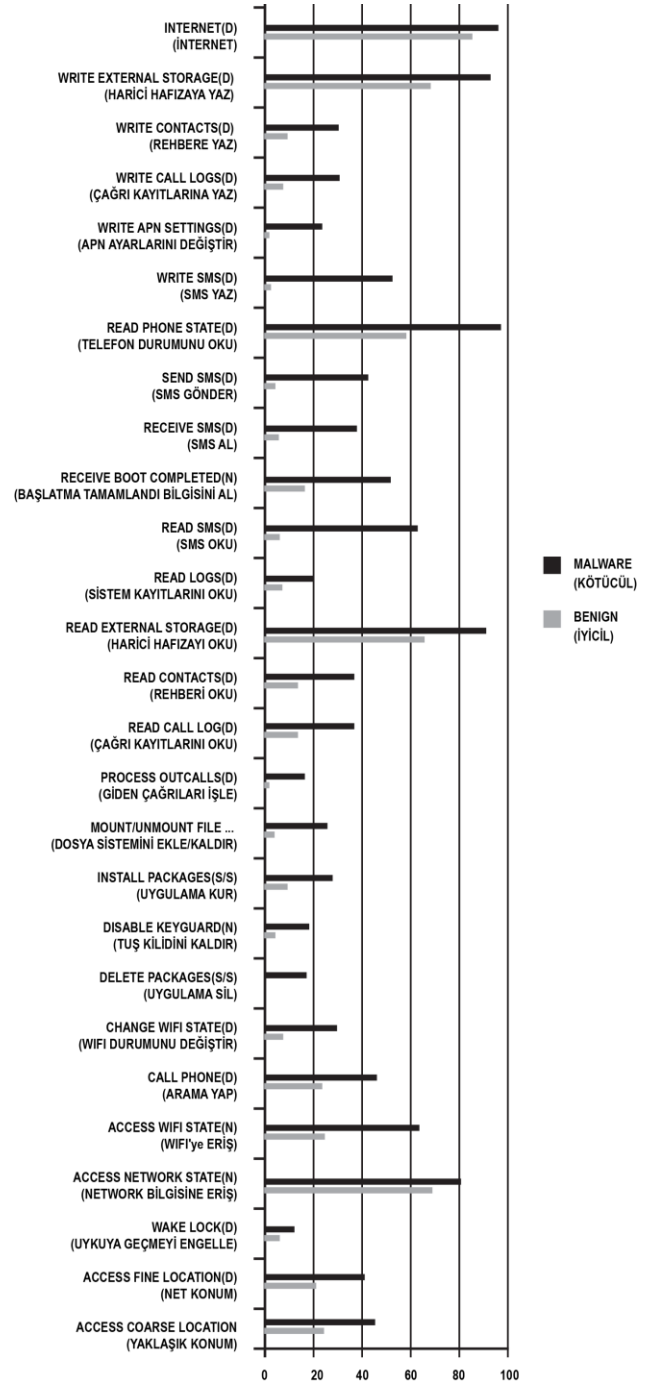
### Statik Analiz Yöntemi

Statik analiz, yazılımın çalışmasına gerek kalmadan uygulamanın apk'sı üzerinden analiz yapılan test tekniklerinden biridir. Drebin, statik analiz yöntemi ve makine öğrenmesi algoritmalarını birlikte kullanarak kötü amaçlı yazılım tespit etmeyi amaçlayan bir araçtır (Arp vd., 2014). Uygulamanın kaynak kodunu ve AndroidManifest.xml dosyasını kullanarak uygulama tarafından kullanılan izinler, internet adresleri ve API çağruları birleşik uzay vektörüne gömülerek kötü amaçlı yazılım tespiti için kullanılmaktadır. Android ApkTool, tersine mühendislik yöntemleri ile Android apk dosyalarını analiz ederek tekrar derlenmesini sağlamaktadır (Apktool, 2010). ApkAnalyser, statik analizi kullanan kötü amaçlı yazılım tespit araçlarından biridir (Sony Mobile Communications, 2012). Androguard, tersine mühendislik yöntemleri ve statik analiz

kullanılarak kötü amaçlı yazılım tespit etmeyi amaçlayan bir araçtır (Dattani, 2015). Androguard, Linux/Windows/OSX platformlarını destekleyen python tabanlı araçtır. Dexter, statik analiz tekniğini kullanarak kötü amaçlı yazılım tespit etmeyi amaçlayan araçtır (Westervelt, 2013). Felt ve diğerleri (2011) tarafından yapılan çalışmada, çok fazla izin kullanan Android uygulamaları keşfetmeye yarayan Stowaway adında bir sistem geliştirilmiştir. Stowaway, mobil uygulamaların kullandığı Uygulama Programlama Arayüzleri (Application Programming Interface - API) çağrı kümesini bulup, çağrıları izinler ile eşleştirmeyi sağlamaktadır. Stowaway'i oluşturan iki kısım vardır: Bunlardan ilki uygulamaların kullandıkları Uygulama Programlama Arayüzleri'ni tespit etmektedir. İkincisi ise, izinleri eşleştirip Uygulama Programlama Arayüzleri çağrılarının kullandığı izinlerin belirlenmesini sağlamaktır. Wu ve diğerleri (2012) tarafından yapılan çalışmada, 238 kötü niyetli yazılım ile 1500 iyi niyetli yazılımdan faydalanılarak uygulamaların türlerinin tespiti amaçlanmıştır. Uygulamaların AndroidManifest.xml dosyalarındaki izinler, aktiviteler, servisler, alıcılar ve API çağrıları özellik olarak kullanılmıştır. Shaowu Liu ve diğerleri (2013) tarafından yapılan çalışmada, uygulamaları sınıflandırmak için veri kümesi olarak hem iyi niyetli hem de kötü niyetli uygulamalardan yararlanılmıştır. Shaowu Liu ve diğerleri kötü amaçlı yazılım için, ilk olarak Zhou ve Jiang tarafından 2012'de yayınlanan ve üçüncü parti uygulama dağıtım marketlerinden elde edilen karşılaştırmalı kötü amaçlı uygulama veri kümesini kullanmışlardır. İyi niyetli uygulamalar için ise üçüncü parti uygulama dağıtım marketleri olan SlideMe ve Pandaapp'den elde ettikleri kendi veri kümelerini kullanmışlardır. Bu veri kümesi oluşturulurken, uygulamaların indirilme sayıları ve kullanıcıların uygulamalara verdiği puanlar baz alınarak derecesi en yüksek olanlar veri kümesine dahil edilmiştir. Bu belirlemede 43 tane antivirüs programı kullanılarak hepsinden olumlu geçenler iyi niyetli uygulama veri kümesine dahil edilmiştir. Son dönemdeki çalışmaların aksine yalnızca

AndroidManifest.xml dosyasında belirtilen gerekli izinlere (required permissions) odaklanılmamış, uygulama indirildikten sonra yer alan ve akıllı telefonun işletim sistemi tarafından kullanılan izinler (used permissions) de ele alınmıştır. İyicil ve kötüçül veri kümelerini başlangıçta analiz etmek için hiyerarşik Biclustering methodu kullanılmıştır. Kötüçül uygulamaları iyicil olanlardan ayırmak için kullanılabilir ilginç izin kümelerini tanımlamak için Contrast Permission Pattern Mining algoritması önerilmiştir. Önerilen Contrast Permission Pattern Mining algoritması kötüçül yazılım tespitinde, hem uygulama için kullanılması gerekli olan izinleri hem de uygulama için gerekli olmadığı halde kullanılan izinlerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini kanıtlamaktadır. Quang Do ve diğerleri (2014) tarafından yapılan çalışmada, gizli veri sızıntılarını önlemek için muhalif bir model önerilip, gizlice sızdırılan verilerin önleme teknikleri gösterilmiştir. Mobil veri sızıntısını engelleme tekniği (Mobile Data Exfiltration Technique - MDET) çeşitli ortamlarda sızıntıları engellemek ve Android cihazlarda ikili (binary) verileri ayıklayarak kod enjekte etme (code injection) metotlarını desteklemek amacıyla tasarlanmıştır. Bu işlem ikili kod seçme ve analiz (binary code selection ve analysis), SMALI kod enjekte etme ve düzenleme (code injection ve modification) ve ikili yeniden derleme (binary recompilation) olmak üzere üç ana aşamadan oluşmaktadır. İspat olarak, standart mobil cihazlar kullanılarak SMS ve işitilemez ses aktarımı gibi yöntemlerle veri sızıntısını önleme yöntemlerinin uygulanabilirliğinin gösterimi sağlanmıştır. Shina Sheen ve diğerleri (2014) tarafından yapılan çalışmada, kötüçül yazılım analizi için Android tabanlı zararlı yazılım ve çok özellikli işbirlikçi karar füzyon (MCDF) yapısı kullanılarak ölçeklenebilir bir tespit mekanizması göz önüne alınmıştır. Statik analiz yöntemi kullanılarak AndroidManifest.xml dosyası analiz edilip uygulamaların kullandığı izinler ve API çağrıları elde edilmiştir. İzin ve API çağrıları tabanlı özellikler kullanılarak, bir sınırlayıcı topluluk oluşturulup bunların kararları birleştirilerek daha iyi bir metot

belirlenmeye çalışılmıştır. Zararlı ve zararsız yazılımlardaki en sık kullanılan izinlerin bazıları oluşum yüzdesi olarak Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Zararlı ve zararsız yazılımlarda en sık kullanılan izinlerin oluşum yüzdesi (Shina Sheen ve diğerleri (2014))

Kang ve diğerleri (2015) tarafından yapılan çalışmada, kötüçül yazılım tespiti için uygulama geliştiricilerinin bilgilerini kullanan statik analiz

tabanlı bir çalışma sunulmuştur. Yapılan çalışmada kötüçül uygulamaların seri numaraları ile geliştiricilerin uygulamalarının seri numaraları karşılaştırılarak uygulamaların güvenlik durumunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Anwar ve diğerleri (2016) tarafından yapılan çalışmada, mobil botnet algılamayı amaçlayan statik analiz tabanlı bir sistem önerilmektedir. Geliştirilen sistem izinler, alıcılar ve arka plan servisleri gibi özellikleri kullanarak uygulamaları sınıflandırmaktadır. DroidOL, kötü amaçlı yazılımları tespit etmeyi amaçlayan makine öğrenmesi tabanlı çevrimiçi hizmet sunan uygulamadır (Narayanan vd., 2016). Bu sistem üç aşamadan geçilerek geliştirilmiştir. İlk aşamada, statik analiz yöntemi kullanılarak işlemler arası kontrol akış grafikleri oluşturulmuştur. İkinci aşamada, Weisfeiler-Lehman çekirdeğinden yararlanılarak işlemler arası kontrol akış grafiklerinin alt grafikleri oluşturulmuştur. Son olarak ise ilk iki aşamada çıkartılan özellikler kullanılarak kötüçül yazılım tespit edebilmek için çevrimiçi bir pasif agresif sınıflandırıcı eğitilmektedir. AndroDialysis çalışmasında (Feizollah vd., 2016), uygulamanın AndroidManifest.xml dosyasındaki niyetlerin analizi yapılarak kötüçül yazılım tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Statik analiz yöntemi ile yapılan çalışmada kullanılan niyetlerin izinlere göre daha etkili olduğu savunulmuş olmasına rağmen niyetlerin kötüçül yazılım tespitinde izinlere kıyasla daha başarısız olacağı vurgulanmıştır. Sokolova ve diğerleri (2017) tarafından yapılan çalışmada, grafik tabanlı izin örüntüleri kullanılarak Android uygulamaların sınıflandırılması ve anormal davranışların tespit edilebilmesi amaçlanmaktadır. Yapılan çalışmada kategorize edilen uygulamaların davranışları analiz edilerek, beklenen davranışlar ile karşılaştırılmaktadır. Ek olarak kategorik uygulamalar ve kullanılan izinler grafik analiz metrikleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen modeller, kategorik olarak sınıflandırılan uygulamaların performansına göre değerlendirilmektedir. Wu ve diğerleri (2017) tarafından yapılan çalışmada, izin sızıntılarını tespit eden statik analiz tabanlı bir yaklaşım

önerilmektedir. Yapılan çalışmada geliştiriciler tarafından Android uygulamalara eklenen ama kullanılmayan izinlerin tespiti yapılarak kötüçül uygulamaların bu izinleri kullanmasını engellemek amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada 550 uygulama kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin başarı oranının %68 olduğunu göstermektedir. Park ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada, Android kötüçül yazılım tespiti için API (Application Programming Interface) ve izin tabanlı sınıflandırma yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntemde uygulamalar iyicil, kötüçül ve şüpheli olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır. API (Application Programming Interface) ve izin tabanlı sınıflandırma sistemi YARA adı verilen kurala göre oluşturulmaktadır. Her uygulamanın nitelikleri AndroidManifest.xml ve classes.dex dosyasından çıkartılarak YARA kuralı ile eşleştirilmektedir. Şahin ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada, Android kötüçül yazılım tespiti için diğer çalışmaların aksine izin tabanlı statik analiz yöntemini kullanarak izin ağırlıklı yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yöntemde her bir izne birbirinden farklı puanlar verildikten sonra K-En Yakın Komşu (KNN) ve Naive Bayes (NB) algoritmaları uygulanarak önerilen yöntem önceki çalışmalar ile karşılaştırılmaktadır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin başarı oranının %96,64 olduğunu göstermektedir. Arslan ve diğerleri (2019) tarafından yapılan çalışmada, uygulamanın çalışması için ihtiyaç duymadığı halde kullanıcıdan talep edilen izinlerin şüpheli faaliyetler için kullanılabilmesi savunulmaktadır. Bu şüphe uyandıran yedek izinleri tespit edebilmek için statik ve kod analizi yöntemi kullanılmaktadır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin başarı oranının %91,65 olduğunu göstermektedir. Zhu ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada, izinler, hassas API (Application Programming Interface)'ler, monitör edilebilir sistem eventleri ve izin oranları statik analiz yöntemi ile kullanılarak bir Android uygulamanın kötüçül olup olmadığının tespit edilebilmesi amaçlanmaktadır. Yapılan çalışmada önerilen yöntemin performansını doğrulamak için 2130 uygulamadan oluşan veri seti kullanılmaktadır.



DeneySEL sonuçlar, önerilen yöntemin doğruluğunun %88,26 olduğunu göstermektedir. Doğru ve Kiraz (2018) tarafından yapılan çalışmada, statik analiz yöntemi kullanılarak web tabanlı Android kötücül yazılım tespit sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem AndroidManifest.xml dosyasında bulunan izinleri kullanarak uygulamanın iyicil ya da kötücül olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir. Yapılan çalışmada birbirinden farklı dört hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalardan VirusTotal ile birlikte iyicil-kötücül veri setlerinde kullanılan izinlerle yapılan hesaplama yöntemi %97,73 oranıyla en yüksek başarıyı göstermiştir.

### **Dinamik Analiz Yöntemi**

Dinamik analiz tekniği, çalışan bir uygulamanın sergilediği davranışları ve API çağrılarını izleyerek kötücül yazılım tespit edebilmeyi sağlayan yöntemdir. Kötücül yazılımı tespit etmek için dinamik yöntem kullanırken bir zaman kısıtı konulmamalıdır. Örneğin, 1-5 gün arası verildiğinde, saldırgan güncellemeyi 6. gün yaptığı zaman dinamik yöntem kötücül yazılımı tespit edemez. Ayrıca, sofistike bir saldırgan statik ve dinamik analiz çalışmalarını zorlaştırmak için kandırma ve şifreleme kullanan server-side polimorfizmi kullanabilir. Dinamik analiz yaklaşımı diğer analiz yaklaşımlarına göre daha geniş bir bakış açısına sahip olmasına rağmen daha maliyetli olduğu için daha az tercih edilen bir yöntemdir. Burguera ve diğerleri (2011) tarafından yapılan çalışmada, uygulama üzerinde normal olmayan hareketleri tespit eden Crowdroid adında bir sistem geliştirilmiştir. Crowdroid, Strace komutu ile sistem çağrılarını derleyerek uygulamaları iyi niyetli veya kötü niyetli olarak sınıflandırmaktadır. Zhou ve Jiang (2012) tarafından yapılan çalışmada, veri kümesi olarak 49 farklı türden oluşan 1260 adet kötü niyetli yazılım kullanılmıştır. Dinamik analiz tekniği kullanılarak kötücül yazılımların yüklenme aşaması, aktiviteler ve aktiviteler arasındaki veri alışverişi gibi çeşitli davranış biçimleri incelenmiştir. Hooker, otomatik olarak Android uygulamaların dinamik analizini yapar ve açık kaynak kodludur (Bossert ve Kirchner, 2014).

Decafplatform (Dynamic Executable Code Analysis Framework Platform) (Sycurelab, 2016), dinamik analiz metodunu kullanarak anormal davranışları gözlemleyen DECAF Binary Analiz Platformu'dur. DroidScope ise Decafplatform'unun bir eklentisidir. TaintDroid, Enck ve diğerleri (2010) tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu dinamik analiz aracıdır. Bu araç, uygulama içerisindeki veri sızmalarına odaklanarak uygulamaların hassas bilgi gereksinimlerini nasıl kullandığını takip etmektedir. Droidbox, 2011 yılında Patrik Lantz tarafından geliştirilen, dinamik analizi kullanarak uygulamanın davranışlarını analiz eden araçtır (Lantz, P., 2011). Shaptai ve diğerleri (2014) tarafından yapılan çalışmada mobil uygulamaların network davranışları incelenmiştir. Yarı denetimli makine öğrenme yöntemleri, uygulamanın normal davranış kalıplarını öğrenmek ve uygulamanın beklenen davranış sapmalarını tespit etmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada kendini güncelleyebilen kötücül yazılımların tespit edilebilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada aynı türden uygulamaların ağ davranışlarının benzerlik göstereceği vurgulanmıştır. Yapılan testler bu düşüncüyü doğrulamaktadır. Jang ve diğerleri (2016) tarafından yapılan Andro-Profiler çalışmasında, sistem çağrıları dahil olmak üzere entegre sistem günlüklerinden çıkarılan davranış profilleri kullanılarak kötücül yazılımlar sınıflandırılmaktadır. Andro-Profiler, entegre sistem günlüklerini oluşturmak için sanal cihazda kötü niyetli bir uygulamayı çalıştırır ve entegre sistem günlüklerini analiz ederek insan tarafından okunabilen davranış profillerini oluşturmaktadır. Garg ve diğerleri (2016) tarafından yapılan çalışmada, kötücül uygulamaları ağ üzerinde gözlemci bir göz ile ağ etkinliğine bakarak tespit etmeye çalışan bir sistem geliştirilmiştir. Ayrıca geliştirilen model ağ izlerini kullanarak kötücül uygulamaları tespit edebilme, işletim sistemlerinin farklı sürümleriyle çalışabilme, bilinmeyen uygulamaları tespit edebilme ve şifrelenmiş verilerle virüs bulaşmış uygulamaları tespit edebilme yeteneklerine sahiptir. Chang ve diğerleri (2016) tarafından yapılan çalışmada, makine öğrenmesi kullanılarak davranış bazlı

kötücül yazılım algılama sistemi önerilmektedir. Bu çalışmada DroidBox yapısına ek olarak otomatik tetiklenen görünüm tanımlama programı geliştirilmiştir. Bu program sayesinde mobil uygulamalara anlamlı sıraya göre ulaşılmaktadır. Geliştirilen sistem; ön işleme, veri izleme, karar modeli ve veritabanı olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır.

### Hibrid Analiz Yöntemi

Birden fazla mobil kötücül yazılım tespit yöntemini kullanarak kötücül yazılım tespit etmeyi amaçlayan tekniklerden biridir. Wang ve diğerleri (2015) tarafından yapılan çalışmada, anormallik tespiti ile kötüye kullanım tespitini entegre eden yeni bir hibrid mobil kötücül yazılım tespit sistemi geliştirilmiştir. İlk olarak AndroidManifest.xml dosyasındaki statik özelliklerden yararlanılarak statik analiz yöntemi kullanılmıştır. İkinci adımda ise dinamik analiz yönteminden faydalanılmıştır. Çalışma esnasında uygulamanın dinamik özelliklerinin çıkarılması için emülatör ortamında uygulamaları çalıştıracak CuckooDroid kullanılmıştır. Eş zamanlı olarak dinamik API çağruları belirlenmiştir. Dinamik ve statik analizle elde edilen veriler makine öğrenmesi yöntemlerini besleyerek kötücül yazılım tespiti sağlanmıştır. 5560 kötücül

yazılım örneği ve 12000 iyicil yazılım örneği ile çalışma yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda %98,32 oranında başarı elde edilmiştir. Kabakuş ve Doğru (2018) tarafından yapılan çalışmada, hibrid analiz tekniği kullanılarak Android kötücül yazılımların derin analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada kötü amaçlı yazılımları tespit etmek için statik ve dinamik analiz tekniklerini birleştiren mad4a olarak isimlendirilen uygulama çatısı ile uygulamaların karakteristiklerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmanın statik analiz kısmında uygulama izinleri, dinamik analiz kısmında ise emülatörde çalıştırılan uygulamaların davranışları incelenmiştir.

### Literatürdeki Çalışmaların Yeteneklerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada incelenen literatürdeki bazı çalışmaların yetenek karşılaştırmaları Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Literatürdeki çalışmaların yetenek karşılaştırmaları

Çalışmalar	Statik Analiz	Dinamik Analiz	Hibrid Analiz	Çalışma Yılı	Başarı Oranları	Özellikler
Wu ve diğerleri	VAR	YOK	YOK	2012	%97,87	İzinler, aktiviteler, servisler, alıcılar ve API çağruları
Liu ve diğerleri	VAR	YOK	YOK	2013		İzinler
Arp ve diğerleri	VAR	YOK	YOK	2014	%94	İzinler ve kaynak kodlar
Sheen ve diğerleri	VAR	YOK	YOK	2014	%98	İzinler ve API çağruları
Kang ve diğerleri	VAR	YOK	YOK	2015	%98	Uygulama seri numaraları
Sokolova ve diğerleri	VAR	YOK	YOK	2017	-	İzinler ve uygulama davranışları
Şahin ve diğerleri	VAR	YOK	YOK	2018	%96,64	İzinler

Park ve diğerleri	VAR	YOK	YOK	2018	-	İzinler ve API çağruları
Zhu ve diğerleri	VAR	YOK	YOK	2018	%88,26	İzinler, API çağruları, sistem eventleri
Doğru ve Kiraz	VAR	YOK	YOK	2018	%97,73	İzinler
Arslan ve diğerleri	VAR	YOK	YOK	2019	%91,65	İzinler
Burguera ve diğerleri	YOK	VAR	YOK	2011	-	Sistem çağruları
Wu ve diğerleri	VAR	YOK	YOK	2012	%97,87	İzinler ve API çağruları
Zhou ve Jiang	YOK	VAR	YOK	2012	%79,6	Uygulama davranışları, aktiviteler, aktiviteler arası taşınan veriler
Hooker	YOK	VAR	YOK	2014	-	Uygulama davranışları
Jang ve diğerleri	YOK	VAR	YOK	2016	%98	Sistem çağruları ve uygulama davranışları
Wang ve diğerleri	VAR	VAR	VAR	2015	%98,32	İzinler, niyetler, API çağruları, donanım özellikleri ve kodla ilgili bilgiler
Kabakuş ve Doğru	VAR	VAR	VAR	2018	-	İzinler ve uygulama davranışları

## Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Günümüzde bilgisayarların yerini, kullanım kolaylığından dolayı akıllı mobil cihazların aldığı görülmektedir. Akıllı cihazların günümüzde oldukça popüler hale gelmesiyle birlikte kullanım alanı da oldukça çeşitlenmiştir. Bu çeşitlilik mobil kötücül yazılım geliştiricilerinin dikkatini çekmiştir ve bu gelişme onları çeşitli amaçlarla mobil kötücül yazılım geliştirmeye yöneltmiştir. Yapılan araştırmalara göre dünya genelinde %82,8 oranla en çok kullanılan mobil işletim sisteminin Android olduğu gözlenmiştir. Android işletim sisteminin bu denli popüler olması, Linux tabanlı açık kaynak kodlu mobil işletim sistemi olması, resmi uygulama dağıtım kanalı olan Google Play Store tarafında uygulamaların güvenilirliğini test eden etkin bir

alt yapının olmamasının Android'in kötücül yazılımların öncelikli hedefi haline gelmesinde önemli etkileri olmuştur. Bu sebeplerden dolayı her gün yeni bir tür mobil kötücül yazılım tespit edilmektedir. Tüm bu gelişmeler sonucunda Google tarafından 2015 yılında Marshmallow sürümü ile yeni izin kontrol mekanizması duyurulmuştur. Bu gelişme ile birlikte uygulamaların kullanmak istediği izinler kurulum esnasında tamamen kullanıcının tercihine bırakılmaktadır. Fakat bu yöntemin de uygulamaların güvenilirliğini tespit etmek için ne kadar yararlı bir yöntem olduğu merak edilmektedir. Araştırmacılar tarafından gün geçtikçe yeni çalışmalar yapılmakla birlikte daha güvenli ve doğru kötücül yazılım tespit mekanizmaları üretmeyi amaçlayan çalışmalar literatüre girmektedir. Bu çalışmada bahsedilen çalışmaların hiçbiri kötücül yazılım tespiti için %100 çözüm oluşturamasa bile her biri çeşitli yönlerle kötücül yazılımı tespit etmeyi

başarmaktadır. Bahsedilen çalışmalar arasında kötücül yazılım tespiti için en başarılı sonucun %98,32 ile Wang ve diğerleri (2015) tarafından hibrid analiz yöntemi kullanılarak geliştirilen sisteme ait olduğu gözlenmiştir. Android kötücül yazılım tespitinde yapılan hataların minimize edilerek başarı oranının artırılması için bundan sonraki çalışmalarda çok yönlü bir hibrid model üzerinde çalışılması gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca semantik analiz, statik-dinamik analiz, imza tabanlı analiz ve makine öğrenmesi algoritmaları birleştirilip, yeni geliştirmeler üzerinde çalışılarak kötücül yazılım tespiti sağlayan etkin bir araç üretilebileceği düşünülmektedir.

## Kaynaklar

- Anwar, S., Zain, J. M., Inayat, Z., Karim, A., Haq, R. U., ve Jabir, A. N., (2016). A static approach towards mobile botnet detection, 3rd International Conference on Electronic Design (ICED), Thailand.
- Arp, D., Spreitzenbarth, M., Malte, H., Gascon, H. ve Rieck, K., (2014). Drebin: Effective and explainable detection of Android malware in your pocket, *Symposium, Network and Distributed System Security Symposium*.
- Arslan R. S., Doğru İ. A ve Barışcı N., (2019). Permission based malware detection system for Android using machine learning techniques, *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, **29**, 1, 63-91.
- Burguera, I., Zurutuza, U. ve Nadjm-Tehrani, S., (2011). Crowdroid: behavior-based malware detection system for Android, *1st ACM workshop, Security and privacy in smartphones and mobile devices*, 15-25.
- Chang, W.-L., Sun, H.-M. ve Wu, W. (2016). An Android behavior-based malware detection method using machine learning, *IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, Hong Kong.
- Do, Q., Martini, B. ve Choo, K. K. R., (2015). Exfiltrating data from Android devices, *Compute & Security*, 48, 74-91.
- Doğru, İ. A. ve KİRAZ, Ö. (2018). Web-based Android malicious software detection and classification system, *Applied Sciences*, **8**, 9, 1622.
- Enck, W., Gilbert, P., Chun, B.-G., Cox, L. P., Jung, J., McDaniel, P., Sheth, A. N., (2010). TaintDroid: an information-flow tracking system for realtime privacy monitoring on smartphones, *Proceedings, 9th USENIX conference, Operating Systems Design and Implementation*, 393-407, Vancouver.
- Feizollah, A., Anuar, N. B., Salleh, R., Suarez-Tangil, G., ve Furnell, S., (2016). AndroDialysis: Analysis of Android intent effectiveness in malware detection, *Computers & Security*, **65**, 121-134.
- Felt, A.P., Finifter, M., Chin, E., Hanna, S. ve Wagner, D., (2011). A survey of mobile malware in the wild, *Proceedings, SPSM '11 1st ACM workshop, Security and Privacy in Smartphones and Mobile Devices*, 3-14, Chicago.
- Garg, S., Peddoju, S. K. ve Sarje, A. K. (2016). Network-based detection of Android malicious apps, *International Journal of Information Security*, **16**, 4, 1-16.
- Jang, J-W., Yun, J., Mohaisen, A., Woo, J. ve Kim, H. K. (2016). Detecting and classifying method based on similarity matching of Android malware behavior with profile, *SpringerPlus*, **5**, 273, 1-23.
- Kabakuş, A. T. ve Doğru, İ. A., (2018). An in-depth analysis of Android malware using hybrid techniques, *Digital Investigation*, **24**, 25-33.
- Kang, H., Jang, J.-W., Mohaisen, A. ve Kim, H. K., (2015). Detecting and classifying Android malware using static analysis along with creator information, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, **11**, 6.
- Moonsamy, V., Rong, J. ve Liu, S., (2014). Mining permission patterns for contrasting clean and malicious android applications, *Future Generation Computer Systems*, **36**, 122–132.
- Narayanan, A., Yang, L., Chen, L., ve Jinliang, L., (2016). Adaptive and scalable Android malware detection through online learning, 2016

- International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Vancouver.
- Park, J., Chun, H. ve Jung, S., (2018). API and permission-based classification system for Android malware analysis, International Conference on Information Networking (ICOIN), Thailand.
- Seo, S.H., Gupta, A., Sallam, A.M., Bertino, E., Yim, K., (2014). Detecting mobile malware threats to homeland security through static analysis, *Journal of Network and Computer Applications*, **38**, 43–53.
- Sheen, S., Anitha, R. ve Natarajan, V., (2015). Android based malware detection using a multifeature collaborative decision fusion approach, *Neurocomputing*, **151**, 905-912.
- Shabtai, A., Tenenboim-Chekina, L., Mimran, D., Rokach, L., Shapira, B. ve Elovici, Y. (2014). Mobile malware detection through analysis of deviations in application network behavior, *Computers & Security*, 43, 1-18.
- Sokolova, K., Perez, C., ve Lemercier, M., (2017). Android application classification and anomaly detection with graph-based permission patterns, *Decision Support Systems*, **93**, 62-76.
- Şahin, D. Ö., Kural, O. E., Akleylek, S. ve Kiliç, E.,(2018). New results on permission based static analysis for Android malware, 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS), Antalya.
- Wang, P. ve Wang, Y.-S., (2015). Malware behavioural detection and vaccine development by using a support vector model classifier, *Journal of Computer and System Sciences*, 81, 1012-1026.
- Wang, X., Yang, Y., Zeng, Y. ve Tang, C., (2015). Chuan Tang : A novel hybrid mobile malware detection system integrating anomaly detection with misuse detection, *Proceedings*, 6th International Workshop on Mobile Cloud Computing and Services, 15-22, Paris.
- Wu, S., Zhang, Y., Jin, B. ve Cao, W., (2017). Practical static analysis of detecting intent-based permission leakage in Android application, IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT), China.
- Wu, D. J., Mao, C. H., Wei, T. E., Lee, H. M., and Wu, K. P. (2012). Droidmat: Android malware detection through manifest and api calls tracing, *2012 Seventh Asia Joint Conference, Information Security*, Tokyo.
- Zhou, Y. ve Jiang, X., (2012). Dissecting Android Malware: Characterization and evolution, *2012 IEEE Symposium, Security and Privacy*, 95–109, San Francisco.
- Zhu, H.-J., You, Z.-H., Zhu, Z.-X., Shi, W.-L., Chen, X. ve Cheng, L., (2018). Effective and robust detection of android malware using static analysis along with rotation forest model, *Neurocomputing*, **272**, 638-646.
- 
- Statista. Global market share held by the leading smartphone operating systems in sales to end users from 1st quarter 2009 to 2nd quarter 2018. <https://www.statista.com/statistics/266136/global-market-share-held-by-smartphone-operating-systems/> . Yayın tarihi 2018. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.
- IDC. Worldwide Mobile Phone Forecast Update, 2018–2022. <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=US44269718> . Yayın tarihi Eylül 2018. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.
- Statista. Number of available applications in the Google Play Store from December 2009 to December 2018. <https://www.statista.com/statistics/266210/number-of-available-applications-in-the-google-play-store/> . Yayın tarihi 2018. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.
- F-Secure. Another Reason 99% of Mobile Malware Targets Androids. <https://blog.f-secure.com/another-reason-99-percent-of-mobile-malware-targets-androids/> . Yayın tarihi Şubat 2017. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.
- G Data. New malware every 10 seconds!. <https://www.gdatasoftware.com/blog/2018/05/30>

- 735-new-malware-every-10-seconds . Yayın tarihi Eylül 5, 2018. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.
- Android System Architecture.  
[http://elinux.org/Android\\_Architecture](http://elinux.org/Android_Architecture) . Yayın tarihi Haziran 13, 2011. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.
- Apktool. <https://ibotpeaches.github.io/Apktool/> . Yayın tarihi Mart 1, 2010. Güncellenme tarihi Mart 3, 2019. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.
- Sony Mobile Communications. Apkanalyser.  
<https://github.com/sonyxperiadev/ApkAnalyser> . Yayın tarihi Nisan 13, 2012. Güncellenme tarihi Mart 15, 2013. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.
- Dattani. Androguard.  
<http://www.technotalkative.com/part-1-reverse-engineering-using-androguard/> . Yayın tarihi Mart 7, 2015. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.
- Robert Westervelt. Dexter.  
<https://www.crn.com/news/security/240150803/android-dexter-security-tool-could-bolster-mobile-defenses.htm> . Yayın tarihi Mart 14, 2013. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.
- Bossert G. ve Kirchner, D. Hooker.  
<https://github.com/AndroidHooker/hooker> , Yayın tarihi Nisan 14, 2014. Güncellenme tarihi Ağustos 9, 2016. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.
- Sycurelab, Decaf-platform.  
<https://github.com/sycurelab/DECAF> , Yayın tarihi Temmuz 1, 2015. Güncellenme tarihi Şubat 21, 2016. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.
- Lantz, P., Droidbox.  
<https://github.com/pjlantz/droidbox> , Yayın tarihi Haziran 4, 2011. Güncellenme tarihi Ekim 19, 2017. Erişim tarihi Nisan 6, 2019.

## Malware Detection Systems in Android Operating System

### Extended abstract

*Today mobile devices have become an important tool to access information when computers are inaccessible. Smart mobile devices are being used in many different areas for various purposes. Since there has been a significant growth in applications that require constant internet connection, such as social networks, this has adversely affected internet traffic and has caused potential network congestion. This popularity has turned smart mobile devices into the target of malware. According to a study conducted by Statista in the second quarter of 2018, 88% of smartphones sold worldwide between 2009 and 2018 are devices with the Android operating system (Statista, 2018).*

*Android is a Linux-based open source operating system developed by Google. Android has a permission-based security mechanism. The fact that Android operating system has a permission-based security mechanism and does not have an adequate security scan by Google makes it the target of malware developers. According to the report presented in 2017 by F-Secure security corporation, more than 99 percent of mobile malware attack targets Android devices (F-Secure, 2017). In another report presented in 2018 by Statista statistics corporation, it's clear that more than 2.6 millions of applications exist in Google Play Store (Statista, 2018). Another report, presented in September 2018 by G Data Corporation, states that 846.916 new malware applications are detected (G Data, 2018). Many studies have been conducted in*

*the literature to protect users from malware by detecting them. In this study, researches on the detection of Android malware in the literature are examined and presented. We claim that the hybrid analysis method is more efficient than any other malware detection methods available in the literature. Despite a number of precautions taken by Google, a new malware application is still encountered every ten seconds and it's expected that there will be about 3.4 millions of new Android malware application by the end of 2018 (G Data, 2018).*

*Relying on the studies made, new malware detection methods, which will come up with more accurate results, are required for a better mobile malware detection. For an efficient malware detection, we think that, at forthcoming studies, a versatile hybrid model should be investigated based on machine learning algorithms.*

**Keywords:** *Android Operating System, Android permission, malware detection, application security, mobile devices, smart device.*



# Göğüs Verileri Metrikleri Üzerinden Kanser Sınıflandırılması

**Emine CENGİL\***

Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[ecengil@firat.edu.tr](mailto:ecengil@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0003-4313-8694, Tel: (424) 237 00 00 (6335)

**Ahmet ÇINAR**

Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[acinar@firat.edu.tr](mailto:acinar@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0001-5528-2226

Geliş: 17.06.2019, Revizyon: 19.10.2019, Kabul Tarihi: 27.01.2020

## Öz

Göğüs kanseri dünyada kadınlar arasında en sık karşılaşılan kanserlerden birisidir. Hastalık erken teşhis edilmediğinde ölüme yol açabilmektedir. Göğüs kanseri tümörünün doğru bir şekilde sınıflandırılması tıbbi alanda zorlu bir problemdir. Bu çalışmada, iğne aspirasyon tekniği kullanılarak biyopsi parçasından çıkartılmış metrik verileri içeren Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) veri seti kullanılarak kanser veya kanser değil ikili sınıflandırılması gerçekleştirilmektedir. Sınıflandırma işlemi için sinir ağları mimarisi ve keras derin öğrenme kütüphanesi araçlarından yararlanır. Uygulama sonuçları sınıflandırma başarımının % 98 civarında olduğunu göstermektedir. Çalışmada hassasiyet, kesinlik, f1-skoru ve karmaşıklık matrisi gibi performans ölçümlerine ait sonuçlar da verilerek yöntemin başarısı desteklenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Göğüs Kanseri; Sinir Ağları; Çok Katmanlı Algılayıcılar; Keras;

\* Yazışmaların yapılacağı yazar



## Giriş

İnsanlar için doğal ve sezgisel görünen görme ve işitme gibi algıların sonucu olan tanıma ve ayırt etme gibi durumlar makineler için zorlu beceriler olmaktadır. Makinelerin bu gibi problemlerde başarı sağlamasının amaç edinildiği yapay zekâ her geçen gün daha iyiye gitmektedir.

Makina öğrenme tekniklerinden olan derin öğrenme, son zamanlarda oldukça popülerdir. Görüntü işleme, sinyal işleme ve doğal dil işleme gibi birçok problemin çözümünde son teknoloji başarımlar göstermektedir (Cengil ve Çınar 2017).

Hastalıkların teşhis ve sınıflandırılması alanı derin öğrenme yöntemlerinin kullanıldığı alanlardandır. Hastalıkların tespit edilmesinde kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Kullanılan yöntemler hastalığın tipine göre değişmektedir.

Göğüs kanseri oldukça yaygın bir şekilde görülmektedir. Ölümlere de yol açan hastalığın erken teşhisi önemlidir. Göğüsteki nodüllere bakılarak hastanın kanser olup olmadığına karar verilmektedir. Göğüsteki nodüller benign ve malignant olarak sınıflandırılmaktadır. Malignant nodüller hastanın kanser olmasını ifade ederken benign nodüller kanser olmayan hastaya işaret etmektedir (Sette et al. 2018).

Literatürde göğüs kanseri tespiti için birçok sınıflandırma tekniği önerilmektedir. Günümüzde, göğüs kanseri sınıflandırma probleminde uzman sistemler ve makine öğrenme teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek sınıflandırma doğruluğu ve etkili teşhis yetenekleri sağlamaktadırlar.

Douangnoulack et al.(2018), PCA kullanarak minimum sınıflandırma kuralları veren en iyi performans sınıflandırıcıyı bulmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, Wisconsin Meme Kanseri veri setindeki deney sonuçlarına dayanarak, J48 karar ağacı sınıflandırıcısının üç sınıflandırıcı arasında en iyi olduğu

bulunmaktadır: J48 karar ağacı, Azaltılmış Hata Budama Ağacı ve Rastgele Ağaç.

Amrane et al.(2018), iki farklı sınıflandırıcı sunmaktadır: Meme Kanseri sınıflandırması için Saf Bayes (NB) sınıflandırıcısı ve en yakın komşu algoritması(KNN). İki uygulama arasında bir karşılaştırma yapılmaktadır. Çapraz doğrulama kullanarak hassasiyetleri değerlendirilmektedir. Sonuçlar KNN'nin, NB sınıflandırıcısına (% 96.19) göre en düşük hata oranıyla en yüksek doğruluğu (% 97.51) verdiğini göstermektedir.

Aksebzececi vd. (2017), çalışmalarında göğüs kanserinin iyi ve kötü huylu tümör görüntülerini içeren bir görüntü veri seti ile çalışmaktadır. Tümör görüntülerinde doku analizi yapmak; birinci dereceden istatistikler, Gabor ve gri seviye birlikte oluşma matrisi (GLCM) özellikli ekstraksiyon yöntemleri uygulanmaktadır. En yüksek sınıflandırma doğruluğu, Gabor ve GLCM yöntemlerinin özellik kombinasyonu ile Rastgele Ormanlar sınıflandırıcısı tarafından % 82.06'ya ulaşılmaktadır.

Fung Ting et al. (2019), Göğüs Kanseri Sınıflandırmasına Yönelik Konvülsiyonlu Sinir Ağı İyileştirme (CNNI-BCC) adı verilen algoritmayı tıp uzmanlarına meme kanseri teşhisinde zamanında yardım konusunda yardımcı olmak için sunmaktadır. CNNI-BCC, meme kanseri teşhisi uzmanlarına yardımcı olmak için meme kanseri lezyon sınıflandırmasını geliştiren evrişimli bir sinir ağı kullanır. CNNI-BCC, gelen göğüs kanseri tıbbi görüntülerini kötü huylu, iyi huylu ve sağlıklı hastalara sınıflandırmaktadır.

Dora et al.(2017), göğüs kanseri sınıflandırması için yeni bir Gauss-Newton temsil tabanlı algoritma (GNRBA) önermektedir. Eğitim örneği seçiminde seyrek temsili kullanır. Önerilen yöntem, sınıflandırmada en uygun ağırlıkları bulmak için yeni bir Gauss-Newton tabanlı bir yaklaşım getirmektedir. Ek olarak, seyrekliği geleneksel l1-norm yöntemine kıyasla

hesaplamalı olarak verimli bir şekilde değerlendirir. GNRBA'nın etkinliği, UCI Makine Öğrenimi deposundaki Wisconsin Meme Kanseri Veri Tabanı (WBCD) ve Wisconsin Teşhis Meme Kanseri (WDBC) veri tabanında incelenmektedir.

Liu et al.(2019), özellik seçiminde simüle edilmiş tavlama genetik algoritma sargısını (IGSAGAW) yönlendiren bilgi kazanımını kullanan yeni bir meme kanseri akıllı teşhis yaklaşımı önermektedir. Önerilen yaklaşımı, Wisconsin Orijinal Meme Kanseri (WBC) ve Wisconsin Teşhis Meme Kanseri (WDBC) veri setleri üzerinde test edilmektedir.

Toğacar vd (2018), göğüs kanseri sınıflandırma görevi için derin öğrenme yaklaşımlarından biri olan AlexNet yöntemini kullanmaktadır. Çalışma halka açık bir veri seti ile test edilmektedir. Sınıflandırma işlemi Destek Vektör Makineleri ile gerçekleştirilmekte ve % 93,4 oranında doğruluk sağlanmaktadır.

Literatürdeki çalışmalar birçok farklı makine öğrenme algoritması kullanılarak yapılmaktadır. Başarım oranları ise kullanılan veri seti ve probleme göre değişiklik göstermektedir.

Çalışmada, göğüs kanserinin erken teşhisinin önemi vurgulanarak kanser ikili sınıflandırması yapılmaktadır. İşlem için derin öğrenme yöntemi tercih edilmektedir. Popüler kütüphanelerden keras (Francois, 2017) yöntemin gerçekleştirilmesi sırasında kullanılmaktadır. Eğitim ve test işlemleri Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) veri seti kullanılarak sonuçlar gösterilmektedir.

Bu çalışmanın yapısı şu şekildedir; 2. Kısım derin öğrenme yapısını anlatır. 3. Kısım, önerilen yöntem ve deneysel sonuçları ihtiva eder. Son olarak 4. kısım ise çalışmanın sonuçlarını anlatır.

## Çok Katmanlı Algılayıcılar

Geçmişte olasılık ve istatistik ile başlamış olan makine öğrenmesi bazı süreçlerden geçerek önemli ilerlemeler kaydetmiştir. 1950'li yıllarda

yapay zekâ ile uğraşan akademik çevreler bilgisayar görmesi için Yapay Sinir Ağları(YSA) ve Karar Ağaçları yöntemlerini ortaya attı.

YSA, insan beyninin çalışma mekanizmasından esinlenilerek ortaya atılmış bir yöntemdir ve sinir hücrelerinin çalışma şekli simüle edilerek katmanlı ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu yapı 1980'li yılların sonundan 2000'li yılların başına kadar geçen sürede büyük başarılar sağlamıştır (Doğan, 2010).

YSA'nın ilk modellerinde doğrusal olan problemlerin çözümleri başarı ile uygulanmıştır. Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde ise bu modeller ile fayda sağlanamadığından çok katmanlı algılayıcılar geliştirilmiştir.

ÇKA, doğrusal olmayan problemlerin çözümünde başarılı sonuçlar göstermektedir. Çok katmanlı algılayıcılar, en çok bilinen ve çokça kullanılan sinir ağı türüdür. Çoğu durumda, mimari ileri besleme kullanır. İleri besleme, sinyallerin girişten çıkışa olacak şekilde tek yönde iletilmesidir(Popescu, 2009). Bazı durumlarda ise geri yayılım mimarisi kullanılmaktadır.

Çok katmanlı algılayıcılar, mimarilerinde bir giriş, bir çıkış ve birden fazla gizli katman bulundurlar. Bu katmanlarda kaç tane işlem elemanının olacağı problemin tipine göre değişiklik göstermektedir. Katman sayısı ve katmanlardaki işlem elemanı sayısının kaç olacağının kararını vermek için herhangi bir metot bulunmamaktadır. Buna karar verme süreci deneme yanılma yoluyla sağlanır.

Şekil.1. yöntemde de kullanılmış olan bir Çok Katmanlı Algılayıcı mimarisini vermektedir. Ağda, bir giriş, iki gizli ve bir de çıkış katmanı bulunmaktadır. Katmanlardaki işlem akışı girdi katmanından çıktı katmanına olacak şekilde ileriye doğrudur.

## Önerilen Yöntem

Önerilen yöntemde, keras kütüphanesi göğüs kanseri tanı prosedürü için kullanılır. Keras, python dili ile yazılmış olup Tensorflow, CNTK ve Theano kütüphaneleri üzerinde çalıştırılabilmektedir. Hızlı deneyler sağlamaya odaklanarak geliştirilmiştir (Francois, 2017).

**Tablo 1:** Veri setine ait bazı özellik ve veriler

DIAG NOSİS	RADİUS _MEAN	TEXTUR E_MEAN	PERİMETE R_MEAN	AREA_ MEAN	SMOOTHN ESS_MEAN	COMPACTN ESS_MEAN	CONCAVİ TY_MEAN	...	FRACTAL_DİME NSİYON_WORST
0	17.99	10.38	122.8	1001	0.1184	0.2776	0.3001	...	0.1189
0	20.57	17.77	132.9	1326	0.08474	0.07864	0.0869	...	0.08902
1	11.52	18.75	73.34	409	0.09524	0.05473	0.03036	...	0.07036
0	14.25	22.15	96.42	645.7	0.1049	0.2008	0.2135	...	0.1132
1	9.173	13.86	59.2	260.9	0.07721	0.08751	0.05988	...	0.0849
1	11.31	19.04	71.8	394.1	0.08139	0.04701	0.03709	...	0.06641
0	19.1	26.29	129.1	1132	0.1215	0.1791	0.1937	...	0.09203
0	14.87	16.67	98.64	682.5	0.1162	0.1649	0.169	...	0.1065
1	11.64	18.33	75.17	412.5	0.1142	0.1017	0.0707	...	0.09097
..	...	....	....	....	....	.....	.....	...	.....

Çalışma, göğüs kanseri sınıflandırması için eğitim ve test işlemlerinde WBDC veri setini kullanır. İşlem üç katmanlı bir sinir ağı ile gerçekleştirilmektedir.

#### a) Veri Seti

Breast Cancer Wisconsin Diagnostic Dataset (WBDC) veri kümesi, 357 benign ve 212 malignant olan 569 örnekten oluşmaktadır. Her bir örnek kimlik numarası, teşhis (B = iyi huylu, M = kötü huylu) ve 30 özellikten oluşmaktadır. Özellikler, bir göğüs kitlesinin ince iğne aspirasyonunun (FNA) sayısallaştırılmış görüntüsünden hesaplanır (Wolbergh et al. 2011). Veri setine ait bazı özellik ve veriler tablo 1'de gösterildiği gibidir. Bu özelliklerden;

Radius\_mean: merkezden çevreye olan noktaların ortalamaları,

Texture\_mean: gri skala değerlerinin standart sapması,

perimeter\_mean: çekirdek tümörünün ortalama büyüklüğü,

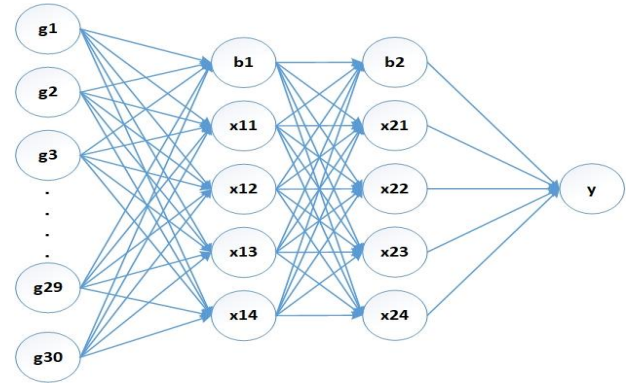
Smoothness\_mean: yarıçap uzunluklarındaki yerel varyasyon ortalamasını ifade etmektedirler.

#### b) Ağ Mimarisi

Önerilen yöntemde, üç katmanlı bir sinir ağı keras kütüphanesi ile inşa edilmektedir. İlgili ağ şekil 1.'de görüldüğü gibidir. 30 giriş özelliği ve

bir hedef değişkene sahibiz. Ağ iki tane gizli katman içermektedir. Her gizli katmanın 4 adet düğümü bulunur.

Gizli katmanlar için aktivasyon işlemi olarak Relu kullanılmaktadır. Son katmanda sınıflandırma işlemi için Sigmoid fonksiyonu kullanılmaktadır. İkili sınıflandırma yapıldığı için kayıp fonksiyonu olarak binary crossentropy tercih edilmektedir.



**Şekil 1:** Kullanılan ağ yapısı

#### c) Deneysel Sonuçlar

Sınıflandırma başarımını ölçmek için birçok metriktten faydalanılmaktadır. Bunlardan bazıları kesinlik (precision), hassasiyet (recall), f1-skor (f1-score), karmaşıklık matrisi, Jaccard İndeksi, zar katsayısı (dice coefficient), Accuracy (Doğruluk), Özgünlük (Specificity) metrikleridir (Hossin ve Sulaiman 2015).

İşlemin başarımını sadece doğruluk veya başka herhangi bir metrikle değerlendirmek doğru

olmamaktadır. Birden fazla metriğe bakılması sonucun doğru değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir.

Çalışmada sınıflandırma başarımını ölçmek için kesinlik, hassasiyet, f1-skoru, doğruluk ve karmaşıklık matrisi değerlerine bakıldı. Tablo I, deneysel sonuçları vermektedir. Şekil 2. ise yöntemin test karmaşıklık matrisini göstermektedir.

**Tablo 2:** Deneysel sonuçlar

	PRECİSİON	RECALL	F1- SCORE	SUPPORT
MALİGNANT	0.98	0.98	0.98	42
BENİGN	0.99	0.99	0.99	72

Performans kriterleri hesaplanırken TP, TN, FP ve FN değerlerine bakılmaktadır.

**TP:** Verinin gerçek sınıfı ve tahmin edilen sınıf doğru,

**TN:** Verinin gerçek sınıfı yanlış ve tahmin edilen sınıf yanlış,

**FP:** Verinin gerçek sınıfı yanlış ve tahmin edilen sınıf doğru,

**FN:** Verinin gerçek sınıfı doğru ve tahmin edilen sınıf yanlıştır.

**Doğruluk (Accuracy):** Doğru sınıflandırılan sınıfların tüm sınıflara oranını ifade etmektedir.

$$\text{Doğruluk} = (\text{TP} + \text{TN}) / (\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN})$$

$$= (41 + 71) / (41 + 71 + 1 + 1) = 0,98$$

**Kesinlik (Precision):** Pozitif bir sınıftaki toplam öngörülen biçimlerden doğru şekilde öngörülen pozitif kalıpları ölçmek için kullanılır (Hossin ve Sulaiman 2015).

$$\text{Kesinlik} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP})$$

$$= 41 / (41 + 1) = 0,98$$

**Hassasiyet (Recall):** Doğru pozitiflerin doğru pozitif ve yanlış negatif toplamına oranıdır.

$$\text{Hassasiyet} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN})$$

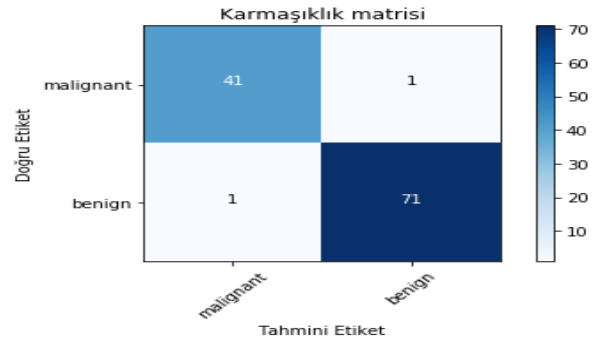
$$= \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN}) = 0,98$$

**F1-skor:** Kesinlik ve hassasiyet kavramları üzerinden hesaplanır.

$$\text{F1-skor} = 2 * (\text{Hass.} * \text{Kes.}) / (\text{Hass.} + \text{Kes.})$$

$$= 2 * (0,98 * 0,98) / (0,98 + 0,98) = 0,98$$

**Karmaşıklık matrisi:** Modelin doğruluğunu bulmak için kullanılan en basit ve sezgisel metriklerden bir tanesidir.



**Şekil 2:** Modelin test ve karmaşıklık matrisi

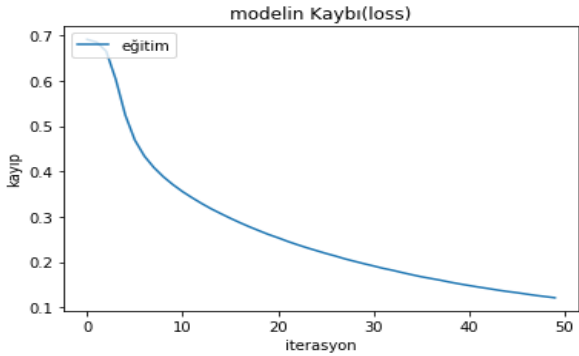
Şekil 3. ve Şekil 4. ağız eğitimine ait doğruluk ve kayıp grafiklerini vermektedir. Verilen grafiklerde modelin kaybının 0,1 ve başarımının % 98 civarında olduğu görülmektedir. Veri setindeki değerlerin %80'i eğitim ve %20'si test için kullanılmıştır.

**Tablo 3:** Karmaşıklık Matrisleri

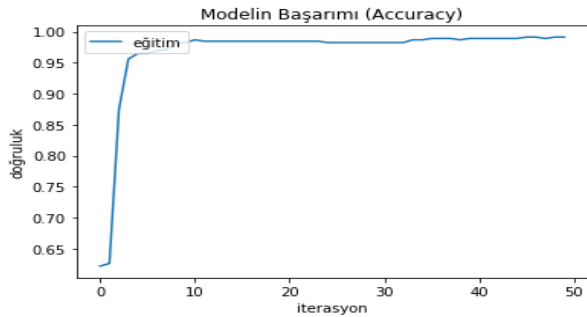
		B	M
GNRBA	MALİGNANT ÖRNEKLER	131	0
	BENİGN ÖRNEKLER	2	39
BİZİMKİ	MALİGNANT ÖRNEKLER	41	1
	BENİGN ÖRNEKLER	1	71

Test için kullanılan 114 veriden 72 tanesi benign ve kalan 42 tanesi ise malignant örnektir. Tablo 3. giriş kısmında bahsedilen bir çalışma ile çalışmamızın sonuçlarını vermektedir. Dora ve arkadaşlarının yöntemi olan, GNRBA ismi verilen yöntem, veri setinde işlem yaparken verileri farklı oranlarda eğitim ve test kısımlarına bölmüştür. Bizim çalışmaya en yakın olduğundan %70 eğitim ve %30 test olarak kısımlandırılan uygulamanın sonucu gösterilmiştir. GNRBA yöntemi, kendi çalışmalarında önceki çalışmalarla kıyaslandığında en iyi sonuçları göstermiştir. Bizim çalışmamız ile ise yaklaşık olarak aynı sonuçları vermektedir.

Tablo 2’de ise çalışmamıza ait kesinlik, hassasiyet ve f1-skoru performans kriterleri verilmektedir.



Şekil 3: Modelin eğitim kayıp grafiği



Şekil 4: Modelin eğitim Doğruluk grafiği

## Sonuç

Bu çalışma göğüs kanseri erken teşhisine dikkat çekmektedir. Göğüs kanseri nodülü sınıflandırması malignant ve benigndir. Çalışmada, sınıflandırma işlemi için bir sinir ağı tercih edilmektedir. WBDC veri seti kullanılarak yapılan deneylerle önerilen yöntemin başarımı bazı metrikler ile gösterilmektedir. Sonuçlar, kanser sınıflandırmada yöntemin başarısını ortaya koymaktadır.

## Kaynaklar

Cengil E., Çınar, A., (2017). Image classification with caffe deep learning framework. In Computer Science and Engineering (UBMK), International Conference on (pp. 440-444). IEEE.

Sette G., Salvati V., Giordani I., Pillozzi E., Quacquareni D., Duranti E., De Nicola F., Pallocca M., Fanciulli M., Falchi M., Pallini R., Conditionally reprogrammed cells (CRC) methodology does not allow the in vitro expansion of patient-derived primary and metastatic lung

cancer cells. *International journal of cancer*. 2018.

Phonethep D., Boonjing V., Building Minimal Classification Rules for Breast Cancer Diagnosis. *2018 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*. IEEE, 2018.

Amrane M., Oukid S., Gagaoua I., Ensarî T., Breast cancer classification using machine learning. In *2018 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting (EBBT)* (pp. 1-4). IEEE. 2018.

Aksebzeçi H. B., ve Kayaaltı Ö., Computer-aided classification of breast cancer histopathological images. *Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO)*, 2017. IEEE, 2017.

Ting, F.F., Yen J.T., and Kok S. S., Convolutional neural network improvement for breast cancer classification. *Expert Systems with Applications* 120 (2019): 103-115.

Dora, L., Agrawal S., Panda R. And Abraham A., Optimal breast cancer classification using Gauss–Newton representation based algorithm." *Expert Systems with Applications* 85 (2017): 134-145.

Liu N., Qi E.S., Xu M., Gao B., Liu G.Q., A novel intelligent classification model for breast cancer diagnosis. *Information Processing & Management*, 56(3), 609-623, 2019.

Toğacar M., and Ergen B., Deep Learning Approach For Classification Of Breast Cancer. *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*. IEEE, p. 1-5, 2018.

Francois C., *Deep learning with python*. Manning Publications Co., 2017.

Doğan G., (2010). Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Türkiye’deki Özel Bir Sigorta Şirketinde Portföy Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, İstatistik Bölümü.

Popescu, Marius-Constantin, et al. "Multilayer perceptron and neural networks." *WSEAS Transactions on Circuits and Systems* 8.7 (2009): 579-588.

Wolbergh W.H., Street W.N., Mangasarian OL. March 2011. Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Data Set.

Hossin M., and Sulaiman M.N., "A review on evaluation metrics for data classification evaluations." *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process* 5.2 (2015): 1.

## Cancer Classification by Breast Data Metrics

### Extended abstract

*Breast cancer is one of the most common cancers in the world. The disease can lead to death if not diagnosed early. Correct classification of breast cancer tumor is a challenging problem in the medical field. There are many machine learning methods for cancer diagnosis. Deep learning has become a popular method in recent years.*

*The latest technology is used to solve many problems according to performance criteria. Binary or multiple classification is a popular area where neural network based methods are used.*

*In this study, dual classification of cancer, not cancer, is performed using the Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) data set, which includes metric data extracted from the biopsy specimen using needle aspiration technique. The Wisconsin Diagnostic Dataset (WBDC) data set for Breast Cancer consists of 569 samples, 357 benign and 212 malignant. Each sample identification number consists of identification (B =benign, M = malignant) and 30 features. Properties are calculated from the digitized image of fine needle aspiration (FNA) of a breast mass.*

*Neural networks architecture and keras deep learning library tools are used for the classification process. In the proposed method, the keras library is used for breast cancer diagnostic procedure. Keras is written in python and can be run on Tensorflow, CNTK and Theano libraries. Developed with a focus on providing quick experiments.*

*In the method, a three-layer neural network is constructed with a library of keras. We have 30 input properties and one target variable. The network comprises two hidden layers. Each hidden layer has 4 nodes. Relu is used as the activation process for hidden layers. In the last layer, sigmoid function is used for classification. Since binary classification is made, binary crossentropy is preferred as loss function.*

*In this study, the results of performance measurements such as precision, accuracy, f1-score and complexity matrix were given and the success of the method was supported. Application results show that the classification performance is around 98%.*

**Keywords:** Breast Cancer; Neural Networks; Multilayer Perceptrons; Keras.

# İnternet üzerinden kontrol edilen tam otomasyonlu akıllı ev sistemleri için örnek bir uygulama

*An example application for fully automated smart home systems controlled over internet*

Özen Sine<sup>1</sup>, Yücel Koçyiğit<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Manisa Büyükşehir Belediyesi, Ek Hizmet Binası, 2. Anafartalar mah., Şehzadeler, Manisa, ozensine@windowslive.com

<sup>2\*</sup> Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yunusemre, Manisa, yucel.kocyiigit@cbu.edu.tr

## MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*

Geliş: 21 Ekim 2019  
Düzeltilme: 3 Nisan 2020  
Kabul: 6 Nisan 2019

*Anahtar kelimeler:*

Akıllı Ev, Otomasyon, İnternet, MSP432

## ÖZET

Bu çalışma ile günlük yaşamda ev ortamında gerçekleştirilen bazı rutin işlerin internet üzerinden akıllı cep telefonu, tablet veya Wifi desteği olan TV üzerinden kablosuz olarak uygulaması yapılmıştır. Sulama, ısı, ışık düzeyi, vb. parametreler de internet üzerinden periyodik veya isteğe bağlı kontrol edilerek insan hayatını kolaylaştıran uygulamalar incelenmiştir. Bu amaçla kontrol sisteminin verimini maksimumda tutabilmek için düşük güç tüketimi ve performansı ile öne çıkan MSP432 mikrokontrolör kullanılmıştır. Bu çalışma, mevsimsel sıcaklıklara göre ev ortamında sıcaklık kontrolü ve bahçe sulamasını ayarlamak için gelecekteki tam otomatik sistemlere bir örnek olarak kullanılabilir. Ayrıca evde yatağa bağımlı bir hastanın aniden bir sağlık problemi ile karşılaşması durumunda bir hasta takip senaryosu da içermektedir.

Ev ortamını birebir yansıtabilmek ve kontrol edilen parametrelerin rahatça gözlemleyebilmek için tez çalışmasında ev maketi tasarımı yapılmıştır. Ev otomasyonu sisteminde kontrol edilmek istenen her bir parametreye ait sensör, sistemin konforunu artırması için mikrokontrolörle kablosuz haberleşmektedir. Alıcı ve verici arasındaki kablosuz veri aktarımı ESP8266 modülüyle sağlanmaktadır. Sistemin hem verimli veri işleme hem de gelişmiş düşük güç tüketimi konusunda sorunsuz çalışabilmesi için MSP432 mikrokontrolör tercih edilmiştir.

İnternet üzerinden kullanıcı bilgileri girildikten sonra ev otomasyon sistemine erişim sağlanmaktadır. İnternet arayüz programı ile ev ortamının haberleşebilmesi için MQTT haberleşme protokolü kullanılmaktadır. Evdeki her bir parametre anlık olarak gözlemlenebilmekte ve istenildiği zaman müdahale edilebilmektedir.

Doi: 10.24012/dumf.635296

## ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 21 October 2019  
Revised: 3 April 2020  
Accepted: 6 April 2019

*Keywords:*

Smart home, Automation, Internet, MSP432

## ABSTRACT

In this study, some monotonous works performed in the home environment in daily life can be provided wireless over the internet via smart mobile phone, tablet or TV supported by Wifi. The applications facilitated human life have been examined by controlling parameters of irrigation, heat, light level, etc. periodically or optionally via internet. For this purpose, MSP432 microcontroller, which stands out with its low power consumption and performance, is used in order to keep the efficiency of the control system at maximum. This study can be used as an example of future fully automated systems to adjust temperature control and garden irrigation in the home environment according to seasonal temperatures. It also includes a patient follow-up scenario if a bed-dependent patient suddenly encounters a health problem at home. Each parameter in the house can be observed instantly and intervened at any time. The sensor of each parameter that is wanted to be controlled in the home automation system communicates wireless with the microcontroller to increase the comfort of the system. The wireless data transmission between the receiver and transmitter is provided by the ESP8266 module. The MSP432 microcontroller has been chosen to ensure that the system runs smoothly for both efficient data processing and improved low power consumption. After entering user information over the internet, access to home automation system is provided. MQTT communication protocol is used for the communication of the home environment with the internet interface program.

\* Sorumlu yazar / Correspondence  
Yücel KOCYİĞİT  
✉ yucel.kocyiigit@cbu.edu.tr

## GİRİŞ

Akıllı ev tanımı, genel olarak her şeyi kontrol edebilen merkezi kontrol sistemine sahip olan ev şeklinde yapılmaktadır. Daha ayrıntılı olarak tanımlamak gerekirse; akıllı bir ev, çeşitli sistemleri bir arada koordineli bir şekilde kullanarak teknik performansı, yatırımları ve işletim maliyetlerini düşürmeyi, esneklik kazandırmayı en üst seviyeye taşıyan yapıdır [1].

Akıllı Ev teknolojisi ile insanların, günlük yaşamlarında modern teknolojiler kullanılarak oluşturulan otomasyon sistemleri sayesinde güvenlik, iletişim, konfor, tasarruf, kontrol vb. birçok alanda hizmet almaları mümkündür. Bunlardan bazıları aydınlatma kontrolü, güvenlik sistemleri, hareket detektörleri, iklim kontrolü ve benzerleridir. Ayrıca günümüzde her evde ve yanımızda sürekli taşıdığımız akıllı telefonlarda bulunan internet sayesinde akıllı ev uygulamaları son zamanlarda internet üzerinden kontrol edilmeye başlanmıştır [2].

Akıllı ev otomasyon sistemleri, evlerde kullanılan elektrik ve elektronik cihazların kullanıcı dostu bir arayüzle uyumlu şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bu sistemler konfor ve ergonomi sağlamalarının dışında enerji tasarrufunu da beraberinde getirirler; hatta belirli bir zaman diliminden sonra maliyetlerini amorti etmektedirler. Özellikle yaşlı ve özürli insanlar için yaşam kalitesini arttırmaktadırlar. Örneğin birçok fiziksel fonksiyondan yoksun biri otomasyon sistemi sayesinde evdeki cihazlarını çalıştırıp durdurabilmekte (açıp kapatabilmekte), gerekli ayarlamaları yapabilmektedir [3]. Günümüzdeki akıllı ev sistemleri genellikle kullanıcının doğrudan veya dolaylı olarak müdahil olduğu kısmi otomasyonlu yapılardır.

Gelecek yıllarda teknolojik alt yapının gelişmesiyle bu yapıların tam otomasyonlu sistemlere dönüşerek hiçbir dış faktör (insan müdahalesi) etkisi olmadan gerçekleşebileceğine şüphe yoktur [4].

Bu alanda yapılan çalışmaların bazılarında GSM teknolojisi üzerine akıllı bir ev otomasyon sistemi tasarlanmıştır. Bu teknoloji, sayısallaştırılmış tonları işleyerek bir telefon hattı üzerinden çalışır ve zamandan ve yerden bağımsız olarak kullanılma avantajına sahiptir [3,5-9]. Aynı şekilde sabit telefon üzerinden kontrol edilen çalışmalar da mevcuttur [10,11]. İnternet kontrolü, tasarım web arayüzüne gömülü bir sunucu kartı ile yapıp sisteme internet üzerinden erişilmiştir [3,12,13]. Diğer araştırmacılar bilgisayar kontrollü akıllı ev otomasyon sistemlerini inceleyerek bir masaüstü veya dizüstü bilgisayardaki arayüz programı aracılığıyla mikro portlara devreden erişilen mikro devrelere erişerek kontrol sağlamışlardır [14,15].

Şekil 1'de gösterildiği gibi çalışmada tasarlanan ev maketindeki deneme odasının sıcaklık kontrolü ve bahçe sulaması, mevsimsel sıcaklıklara göre ayarlanabilmektedir. Isıtma ve soğutma sisteminin mevsimsel sıcaklıklara göre senkronize bir şekilde çalışması kullanıcıya hem ev ortamını daha yaşanabilir kıldığı için konfor açısından hem de sistem değişen sıcaklık değerlerine göre kısa süreli ve daha az enerji gerektiren tepkiler verdiği için tasarruf açısından oldukça avantaj sağlamaktadır. Ayrıca akıllı ev otomasyonuna tümleşik olarak evde yatağa bağımlı bir hastanın sağlık durumunu sürekli kontrol eden hasta takibi de gerçekleştirilmektedir.





Şekil 1. Tasarlanan kontrol sisteminin genel yapısı

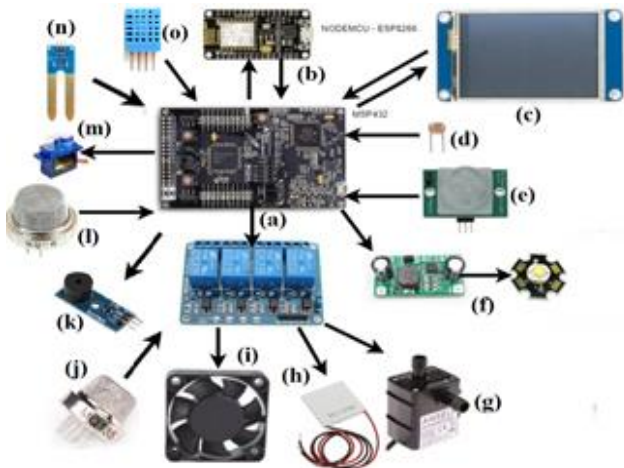
Figure 1. General structure of designed control system

## DONANIMSAL TASARIM

### Kullanılan Elektronik Malzemeler

Bu çalışmada akıllı ev uygulaması için kontrol edilecek parametrelere karar verilerek her bir parametre için piyasadaki en uygun sensör araştırılmış ve istenilen özellikleri karşılayabilecek en küçük boyutlu olanlar seçilmiştir. Böylece yapılan ev maketinin boyutları minimum düzeyde tutulmuştur.

Şekil 2’de mikrokontrolör ve her bir parametrenin kontrol edilmesini sağlayan elektronik malzemeler (sensörler ve yükler) arasındaki veri alış-verişi gösterilmiştir.



Şekil 2. Projede kullanılan elektronik malzemeler arasındaki veri alış-verişi  
Figure 2. Data exchange between electronic materials used in the project

1) *MSP432 Kontrolör:* Texas Instruments tarafından piyasaya sürülen SimpleLink MSP EXP432P401R LaunchPad geliştirme kiti, sistemde kontrolör-denetleyici olarak görev yapmaktadır. Her vericiden (sensörden) gelen veriyi yorumlamaktadır. Programcı-kullanıcı tarafından yazılan algoritmaya göre gerekli çıkışları vererek istenilenler doğrultusunda sistemin tepki vermesini sağlamaktadır. Yazılım geliştirme seti (SDK) ve zengin araç seti ile kullanımı, kolay geliştirme ortamı sunması büyük avantaj sağlamaktadır. Kablosuz bağlantı çözümlerini temel alan uygulamalara yüksek hassasiyetli analog ve bellek uzantısı eklemelerine izin vermektedir [16].

2) *NodeMCU ESP8266:* Espressif Systems tarafından tasarlanan üzerinde ESP8266 denetleyicisi bulunan NodeMCU kiti, çevre parametrelerini kontrol eden sensörler ile kontrolörün kablosuz haberleşmesini sağlayan Wifi modülüdür [17]. Aynı zamanda internet ortamından mevsimsel sıcaklık değerlerinin çekilmesini sağlamaktadır. Veri akışını kablosuz olarak gerçekleştirerek sistemin verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Kablo yığından kullanıcıyı kurtarması oldukça avantaj sağlamaktadır.

3) *3,2" Nextion Dokunmatik Ekran:* İnsan Makine Arabirimi (HMI) çözümü olan Nextion ekran, ev maketi üzerine yerleştirilerek her bir parametrenin programcı-kullanıcı tarafından manuel olarak kontrol edilmesini sağlamaktadır. “Nextion Editör” programı

vasıtasıyla kontrol edilecek parametre sayısı ve cinsine göre kullanıcı ekran arayüzü oluşturulmuştur. Ekran MSP432'ye bağlanarak kontrolör aracılığıyla ev ortamındaki her bir parametrenin kontrol edilmesi sağlanmaktadır. Acil bir durumda veya internet olmadığı zamanlarda ana kontrol ünitesi olarak sistemin çalışmasını ve denetlenmesini sağlamaktadır.

4) *LDR Foto Diyot*: LDR, bahçe aydınlatmasının devreye girmesi için akşam karanlığından faydalanılmasını sağlamaktadır. Gün ışığına LDR tepki göstererek direnç değerinde değişmeye neden olur. Direnç değerindeki değişimle ev maketindeki bahçenin aydınlanması için LED'ler devreye sokulmaktadır.

5) *HC-SR501 PIR Hareket Sensörü*: İçerisinde infrared sensörü olan PIR modülü, eve hırsız girme veya beklenmedik bir durumda can ve mal güvenliği sağlamaktadır. Sensör deneysel odada herhangi bir hareket olup olmadığını düzenli olarak denetlemektedir. Herhangi bir hareket algılanırsa buzzer'ı devreye sokarak kullanıcının uyarılması sağlanmaktadır.

6) *PWM LED Sürücü Modülü ve Power LED*: Ev içi ve bahçe aydınlatmasında 1 Watt'lık Power LED'ler kullanılmıştır. PWM LED sürücü modülü sayesinde aydınlatma şiddeti seviyesi ayarlanarak deneme odasında kullanıcının istediği derecede aydınlatma sağlanmaktadır.

7) *DC40-1245 Su Pompası*: Otomatik bahçe sulamasının kullanıcının isteğine göre yapılmasını sağlamaktadır. Toprak nem sensöründen gelen nem verileriyle senkronize bir şekilde çalışmaktadır. 4,5 metreye kadar saatte 480 litreye kadar su basabilmektedir.

8) *TEC1-12706 Peltier*: Bir termoelektrik sistem elemanı olan Peltier, ev maketindeki deneysel odanın ısıtılarak sıcaklığının istenilen derecede tutulabilmesini sağlamaktadır. DHT11 sıcaklık-nem sensörünün ölçtüğü sıcaklık verilerine göre kullanıcı algoritması doğrultusunda devreye girip çıkmaktadır.

9) *Fan*: 12 V DC gerilim ile çalışan fan, ev maketindeki deneysel odanın soğutularak sıcaklığının istenilen derecede tutulabilmesini sağlamaktadır. DHT11 sıcaklık-nem sensörünün ölçtüğü sıcaklık verilerine göre kullanıcı algoritması doğrultusunda devreye girip çıkmaktadır.

10) *MQ-135 Hava Kalite Sensörü*: Hava kalite sensörü MQ-135, ev maketindeki deneysel odada benzin, alkol ve yangın-duman kaçağının olup olmadığını tespit edilmesini sağlamaktadır. Herhangi bir yangın durumunda duman tespit edildiğinde buzzer devreye alınır kullanıcı uyarılır. Aynı zamanda deneysel odadaki CO2 miktarının sürekli takip edilerek ortamın hava kalitesinin belirlenmesine de imkân tanımaktadır.

11) *YL-44 Buzzer*: Sesli 2 kHz frekans aralığında çalışan ve küçük bir zil modülüdür. YL-44 Buzzer; yangın, gaz kaçağı ve hırsızlık durumunda can ve mal güvenliği için kullanıcıyı uyarılmaktadır.

12) *MQ-6 Gaz Sensörü*: Gaz sensörü MQ-6, ev maketindeki deneysel odada herhangi bir doğalgaz kaçağının olup olmadığını düzenli olarak tespit edilmesini sağlamaktadır. Herhangi gaz kaçağı durumu tespit edildiğinde buzzer devreye alınarak kullanıcı uyarılır.

13) *Servo Motor*: Hafif ve yüksek çıkış gücüne sahip servo motor, ev maketindeki dış kapının açma kapama manevrasının gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Yaklaşık 180 derece dönebilmektedir.

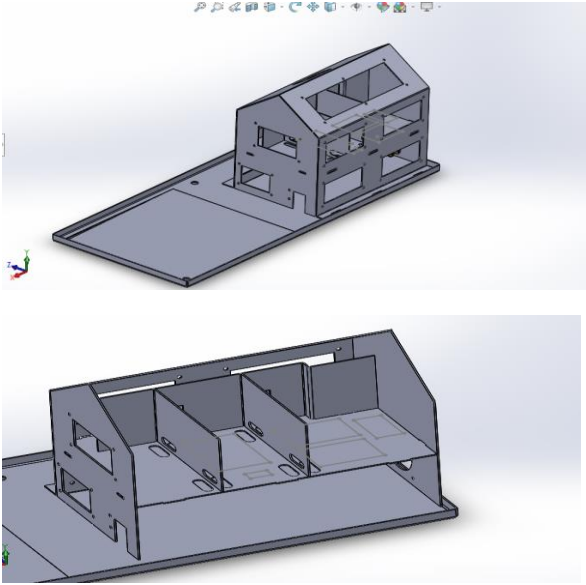
14) *Toprak Nem Sensörü*: Bahçe sulamasının otomatik olarak yapılabilmesi için toprağın nem oranını kontrol edilmesini sağlamaktadır. Sensördeki nem ölçer problemler sayesinde topraktaki suyun neden olduğu dirençten dolayı oluşan gerilim indüklemesinin büyüklüğüne göre nem değeri ölçülebilmektedir. Kullanıcının belirlediği nem eşik değerleri arasında sulama pompası çalışmaktadır.

15) *DHT11 Sıcaklık ve Nem Sensörü*: Kalibre edilmiş dijital sinyal çıkışı içeren

DHT11, ev maketindeki deneysel odanın sıcaklığının istenilen derecede olup olmadığının tespit edilmesini ve nem miktarının ölçülmesini sağlamaktadır. Ölçülen sıcaklık değerine göre Peltier ya da Fan devreye girmektedir.

### Tasarlanan Ev Maketi

Bu çalışmanın esas işlerliğini ve amaçlanan hedefe ne kadar ulaşılabildiğini göstermek ve oluşturulan sistemi doğal ortamında gözlemlemek amacıyla modern bir ev minyatürize edilerek ev maketi hazırlanmıştır. İki katlı olarak tasarlanan evin ilk katı, kontrol edilmesi planlanan parametrelerin ne derecede kontrol edilebildiğini gözlemlemek amacıyla deneme odası olarak tasarlanmıştır. İkinci kat ise 3 odadan oluşmakta olup entegre kartları ve mikrokontrolörü rahatça yerleştirilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Çizimleri Şekil 3’de gösterilen iki katlı ev maketi, bahçe platformu üzerine yerleştirilmiş ve burada modern bir bahçe sulaması ve aydınlatmasının yapılması planlanmıştır.

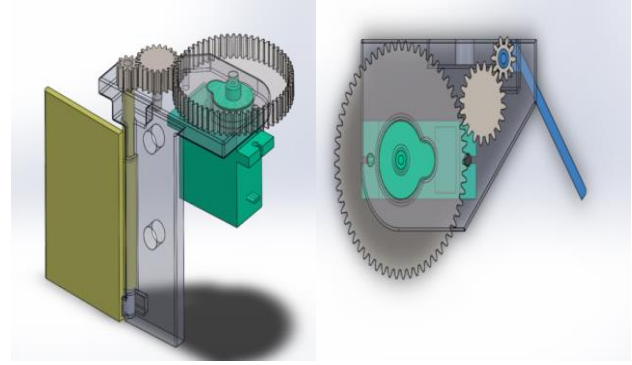


Şekil 3. Tasarlanan ev maketi  
Figure 3. Designed house model

Çizimleri yapılan ev maketi 9 parçadan oluşmakta olup birbirlerine kolayca montaj yapılacak şekilde tasarlanmıştır.

Ev ortamında sıcaklık ve soğukluk kontrolü yapıldığı için pencereler ısı yalıtımı için fleksi ile kapatılmıştır.

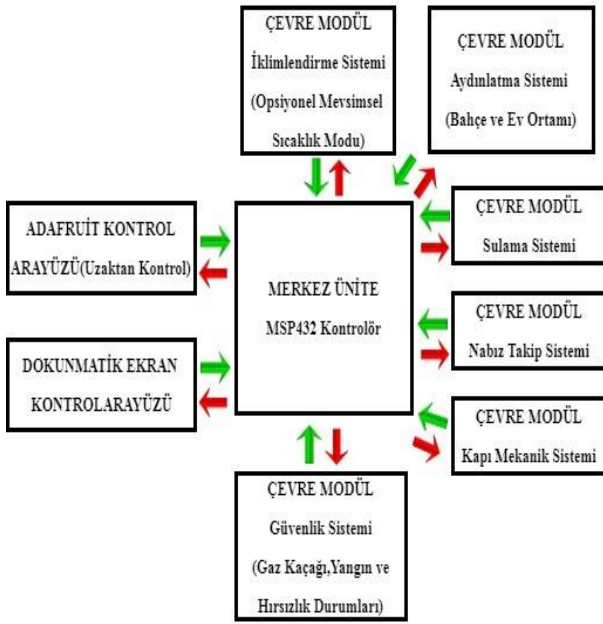
Kullanıcı güvenliği ve konforu için internet üzerinden kapı açma-kapama işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Bu hareketli mekanizmanın sağlanabilmesi için çizimleri Şekil 4’de gösterilen dış kapı özel olarak tasarlanmıştır. Kapının açılması ve kapanması, istenilen derecede ve yönde hareket ettirilmesi için servo motor ve dişli sistemi kullanılmıştır.



Şekil 4. Dış kapı mekanizması  
Figure 4. Outer door mechanism

### YAZILIM TASARIMI

Bu çalışmada “Energia” programı MSP432 mikrokontrolörün, akıllı ev ortamını denetleyebilmesi ve Şekil 5’de haberleşme yapısı gösterilen sistemin planlanan tepkiyi verebilmesi için gerekli algoritmaların yazılıp derlendikten sonra mikrokontrolörün hafızasına yüklenmesini sağlamıştır. Mikrokontrolörün Node MCU ile Nextion 3,2” dokunmatik ekrana veri gönderim-alımı “Energia” programında yazılan kodlar ile mümkün kılınmıştır. Ayrıca kontrolörün kablosuz haberleşmesini sağlayan NodeMCU modülü ile sensörlerden veri alınmasını sağlayan ESP8266’lara algoritmalar “Arduino” programı vasıtasıyla yüklenmiştir. 3,2” Nextion dokunmatik ekran arayüzünün tasarlanması için “Nextion Editör” programı kullanılmıştır. İnternet üzerinden sistemin kontrol edilebilmesi için “Adafruit IO Sistemi” kullanılmış ve kontrol arayüzü tasarlanmıştır.



Şekil 5. Sistem modülleri ile kontrol arayüzlerinin haberleşme yapısı  
Figure 5. Communication structure of system modules and control interfaces

### Uygulama Senaryoları

İnternet üzerinden akıllı ev otomasyon uygulamasında toplam 6 adet senaryo gerçekleştirilmiştir. Aşağıda bu senaryolar ayrıntılarıyla birlikte verilmiştir.

1) *İklimlendirme Senaryosu:* Kullanıcının talebine göre ev ortamındaki sıcaklığın istenilen derecede tutulması sağlanmaktadır. Ev ortamındaki sıcaklık sürekli olarak DHT11 sıcaklık-nem sensörü ile ölçülerek kontrolöre iletilir. Yazılan algoritma doğrultusunda kontrolör, alınan sıcaklık değerlerine tepki vermektedir. Ev sıcaklığı, talep edilen değer altına düştüğünde ısıtma elemanı olan Peltier devreye alınarak ortam sıcaklığı yükseltilir. Aynı şekilde ortam sıcaklığı talep edilen değer üstüne çıktığında soğutma elemanı fan devreye alınarak düşürülür. Bu sayede ev ortamının iklimlendirmesi kullanıcı konforu göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir.

2) *Aydınlatma Senaryosu:* Ev ortamı ve bahçe aydınlatması, 1 watt power LED'ler ile kullanıcı isteğine göre yapılmaktadır. Kullanıcı, ev ortamını PWM modülü sayesinde istediği ölçüde aydınlatabilmektedir. Ayrıca bahçe aydınlatması, sisteme eklenen LDR ile gün

ışığından faydalanılarak otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

3) *Bahçe Sulama Senaryosu:* Bahçe sulaması kullanıcı isteğine göre su pompası ile manuel veya otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Probları toprağa batırılan toprak nem sensörü ile topraktaki nem miktarı ölçülerek kontrolöre iletilir. Yazılan algoritmaya göre kontrolör, topraktaki nem miktarı kullanıcının belirlediği eşik değerinin altına düştüğünde sulama pompasını çalıştırarak bahçe sulamasını gerçekleştirmektedir. Nem miktarı istenilen değere ulaştığında sulama pompasını devreden çıkmaktadır. Böylece tam otomasyonlu bir sulama sistemi kullanıcıya sunulmaktadır.

4) *Güvenlik Senaryoları:* İnternet üzerinden akıllı ev otomasyon uygulamasında kullanıcının can ve mal güvenliği açısından aşağıdaki senaryolar üzerinde çalışılmıştır.

a) *Hırsızlık Senaryosu:* Ev ortamında kullanıcının istediği zaman HC-SR501 PIR hareket algılayıcı sensörü aktif etmesiyle hırsızlığa karşı önlem alınmıştır. Sensör herhangi bir hareket algıladığında buzzer devreye alınarak kullanıcının uyarılması sağlanmıştır.

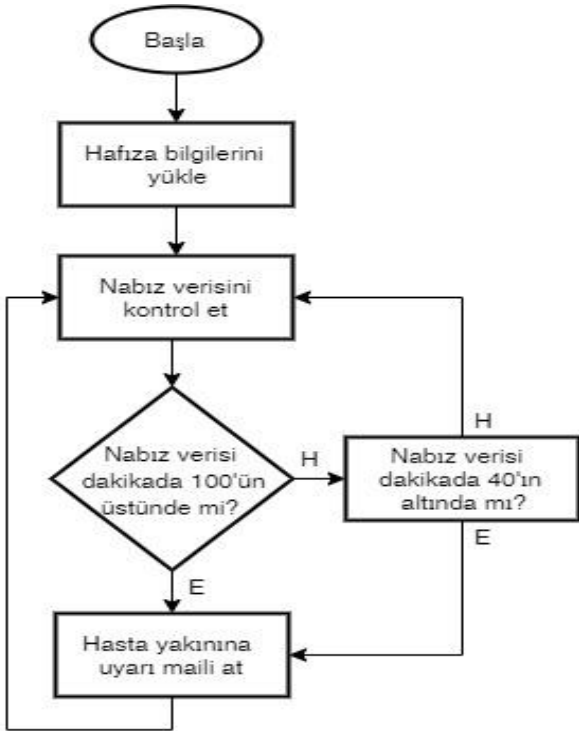
b) *Yangın Senaryosu:* MQ-135 hava kalite sensörü ev ortamında duman tespit etmesi durumunda yangın uyarısı buzzer vasıtasıyla kullanıcıya bildirilmesi sağlanmıştır.

c) *Gaz Kaçağı Senaryosu:* Evde MQ-6 gaz sensörü, gaz kaçağı olması durumunda buzzer devreye alınarak kullanıcı uyarılarak tehlikeden haberdar edilmesi sağlanmıştır.

d) *Dış Kapı Senaryosu:* İki senaryo üzerinde çalışılmıştır. Bunlardan ilki, "Kullanıcının anahtarı içerde unutulması" senaryosuna uygun olarak internet erişimi olan akıllı telefon aracılığı ile kapının açılması sağlanmıştır. Bir diğer senaryoda "kullanıcının evden aceleyle kapıyı çekip çıkması ve kapının kapanmaması" durumunda kapının otomatik olarak kapanması sağlanmıştır. Kapının istenilen derecede ve yönde hareket ettirilmesi servo motor ve dişli sistemi ile sağlanmıştır. Ayrıca kapıya bir adet mıknatıs ve kapı eşiğine bir adet reed switch monte edilmiştir. Reed switch mıknatısı algılayınca kontaklarını kapatmakta, mıknatıs

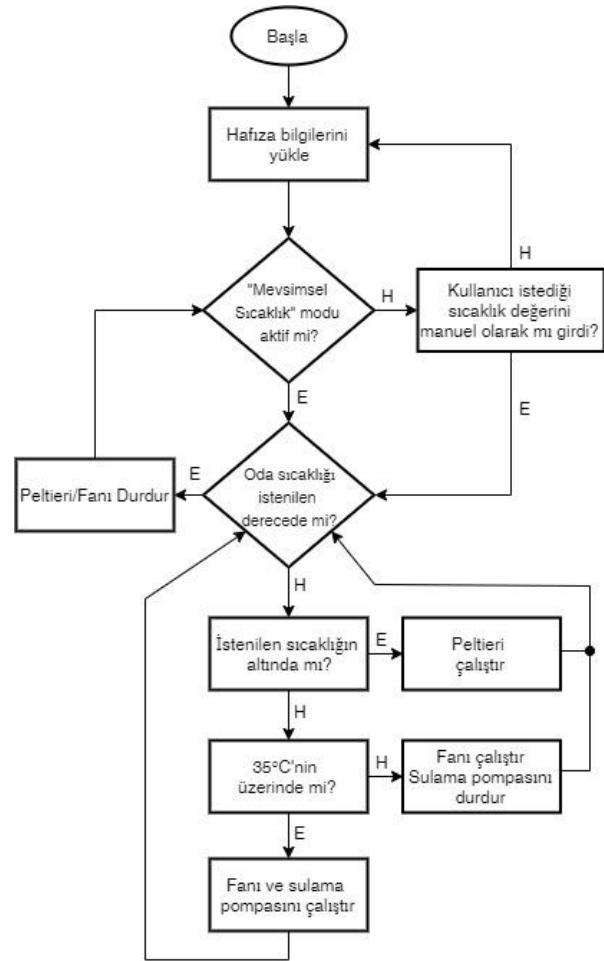
uzaklaşınca kontağını açmaktadır. Böylece kapının açık ya da kapalı olduğu bilgisi mikrokontrolöre iletilmektedir. Eğer kapı açık konumda 30 saniyeden fazla kalırsa kapı kendiliğinden kapanmaktadır.

5) Sağlık (Nabız takip) Senaryosu: Gerentechnology (yaşlılar için teknoloji) kavramı kapsamında evde bakıma muhtaç veya sürekli yatağa bağımlı bir bireyin bulunması ve bu bireyin beklenmedik herhangi bir sağlık sorunuyla karşılaşabilme ihtimali üzerinde durulmuştur. Şekil 6'da akış diyagramı gösterilen senaryoda bakıma muhtaç bireyin sürekli olarak nabız takibi yapılmaktadır. Bireydeki anormal nabız değişikliklerine göre (aşırı düşmesi veya artması durumunda) sistemin acil sağlık ekibine veya yakınına eposta yoluyla haber verilmektedir. Böylece en kısa sürede hastaya müdahale edilerek can güvenliğinin sağlanması amaçlanmıştır.



Şekil 6. Nabız takip sistemi akış diyagramı  
Figure 6. Pulse monitoring system flow diagram

6) Mevsimsel Sıcaklık Senaryosu: Çalışmada tasarlanan ev maketindeki deneme odasının sıcaklık kontrolü ve bahçe sulaması, akış diyagramı Şekil 7'de gösterilen internet ortamından çekilen anlık mevsimsel sıcaklıklara göre ayarlanabilmektedir. Mevsimsel sıcaklık değerleriyle ideal oda sıcaklığı değeri arasındaki fark arttıkça yakıt ve enerji sarfiyatı artmaktadır. Bu yüzden kullanıcı konforu ve tasarrufu düşünüldüğünde ev ortamının sıcaklığının kararlılığı çok önemlidir.



Şekil 7. İklimlendirme sistemi akış diyagramı (Opsiyonel mevsim sıcaklık modu)  
Figure 7. Air conditioning system flow diagram (Optional seasonal temperature mode)

Manisa genelindeki mevsimsel sıcaklık değişimlerine göre ısıtma ve soğutma sisteminin otomatik olarak devreye girmesi kullanıcıya

büyük avantajlar getirmektedir. Örneğin daha az yakıt ve elektrik sarfiyatıyla ev sıcaklığı ideal düzeyde tutulabilmekte ve kullanıcının bunun için ekstra bir önlem almasına gerek kalmamaktadır. Mevsimsel sıcaklık değerlerine göre sistem sürekli olarak tepki gösterebilmektedir. Mevsimsel sıcaklık değerinin 23 °C' nin altına düştüğünde Peltier devreye girerek ev ortamını ısıtmakta, 23 °C' nin üstüne çıktığında ise fan devreye girerek ev ortamını soğutmaktadır.

Diğer taraftan bitkiler olumsuz çevre koşullarına (besin maddesi eksikliği, su eksikliği, düşük veya yüksek sıcaklık, ultraviyole ışınları, tuzluluk, hastalık ve zararlılar, vb. gibi) maruz kaldıklarında gelişmeleri olumsuz etkilenir. Bu duruma bitkisel stres denir. Stres sonucu bitkilerde ortalama verim kaybı %65-90'ı bulabilmektedir [18]. Manisa genelinde yetişen bahçe bitkilerinin çoğu (domates, biber, marul, vb.) 35 °C' nin üzerinde sıcaklığa maruz kaldığında strese girmeye başlamaktadır. 45 °C' in üzerindeki sıcaklık değerleri ise öldürücü etkiye sahiptir. Dolayısıyla mevsimsel sıcaklıklar 35 °C' nin üzerine çıktığında kullanıcının herhangi bir zararla karşılaşmaması için bahçe sulaması otomatik olarak devreye girmektedir.

### Kullanılan Kontrol ve Uygulama Programlama Arayüzleri

Akıllı ev otomasyon uygulamasında kontrol sistemi, hem internet üzerinden Web Server aracılığıyla hem de ev ortamında bulunan dokunmatik ekran ile yönetilebilmektedir. Kullanıcının ev otomasyon kontrol sistemini rahat bir şekilde yönetebilmesi amacıyla her iki yöntemle ait kontrol arayüzleri özel olarak tasarlanmıştır. Bu sayede kullanıcının ev otomasyonunu aktif bir şekilde yönlendirebilmesi ve anlık olarak sistemi sürekli takip edebilmesi sağlanmıştır. Ayrıca mevsimsel sıcaklık senaryosunun uygulanması için internet ortamından sıcaklık verileri çekilmektedir. Kullanılan kontrol ve uygulama programlama

arayüzleri hakkında aşağıda bilgi verilmiştir [19].

### Adafruit IO Sistemi Kontrol Arayüzü

Adafruit IO, birden fazla veri beslemesini işleyebilmekte ve görselleştirebilmektedir.

Adafruit IO'ya entegre edilmiş, gösterge panoları ile verilerin grafiklerinin çizilmesine, ölçülmesine, kaydedilmesine ve görüntülenmesine izin vermektedir. Yapılan panolara dünyanın her yerinden görüntüleyebilme olanağı sunmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan Adafruit kontrol arayüzünün nihai hali Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Adafruit kontrol arayüzü

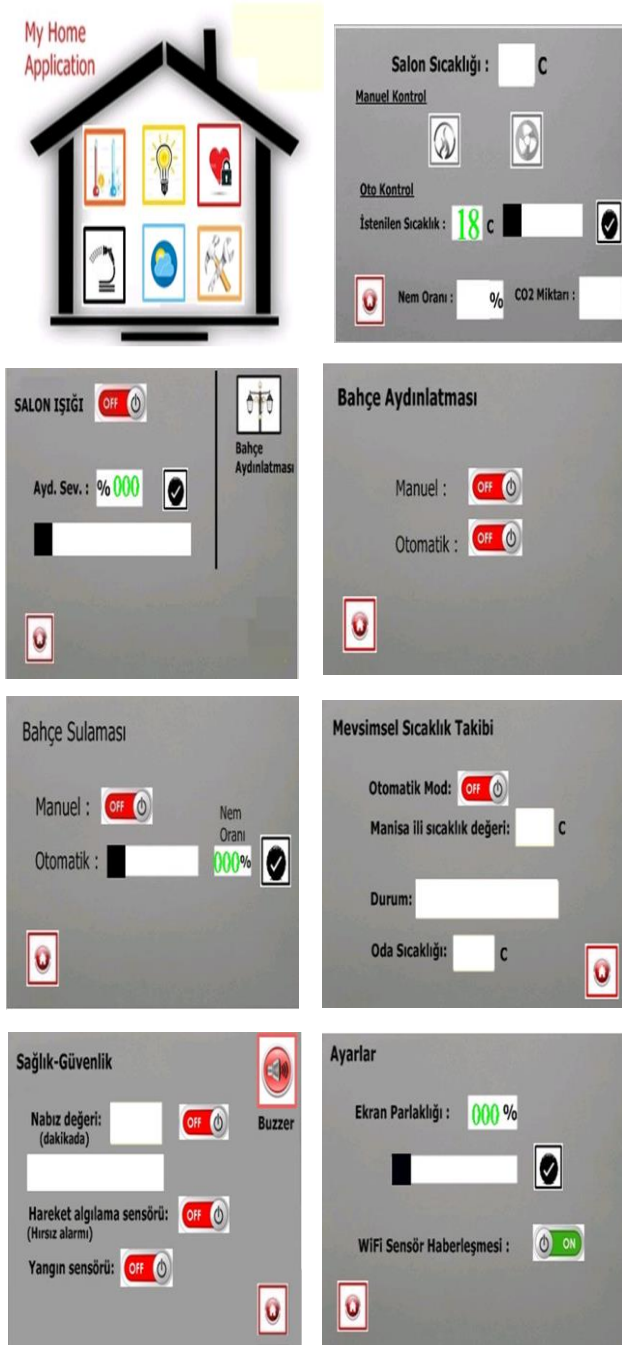
Figure 8. Adafruit control interface

Ev ortamındaki CO<sub>2</sub> miktarının ölçülerek hava kalitesini belirlenebilmesini sağlayan MQ-135 sensöründen Adafruit IO'ya veri gönderimi ve grafiği Şekil 11'de gösterilmiştir. Kullanıcı "Filter" butonuyla istediği tarih aralığındaki verilere erişebilirken "Download All Data" butonuyla da verileri şahsi bilgisayarına indirerek depolayabilir.

### Nextion Dokunmatik Ekran Kontrol Arayüzü

Nextion dokunmatik ekranı, akıllı ev otomasyon uygulamasında ana kontrol ünitesi olarak kullanılmıştır. Bu sayede kullanıcıya internet erişiminin olmadığı veya acil müdahale gerektiren durumlarda manuel olarak ev ortamından sisteme sürekli erişebilmesi

açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Şekil 9'da Nextion dokunmatik ekranın nihai arayüz tasarımları gösterilmiştir.

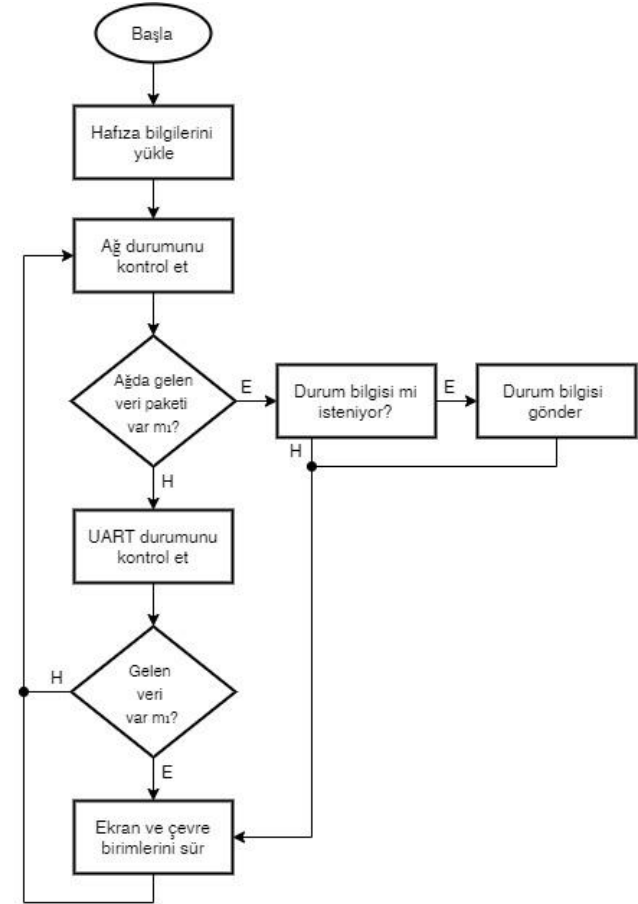


Şekil 9. Nextion dokunmatik ekran kontrol arayüzleri  
Figure 9. Nextion touch screen control interfaces.

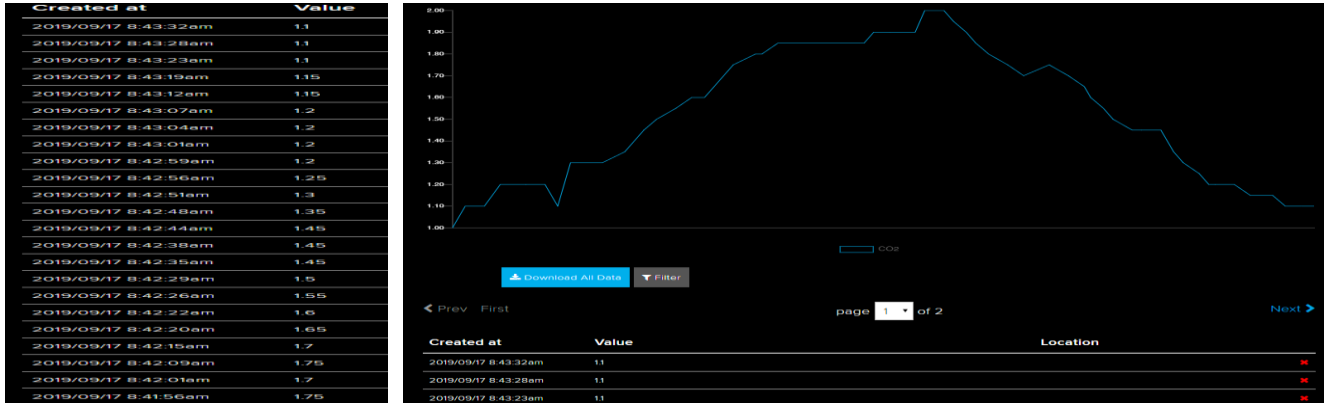
## Openweather API Uygulama Programlama Arayüzü

Tasarlanan ev maketindeki deneme odasının sıcaklık kontrolü ve bahçe sulaması, mevsimsel sıcaklıklara göre ayarlanabilmektedir. Sıcaklık verilerinin internet ortamından çekilebilmesi için Openweather API veri tabanı kullanılmıştır. Mikrokontrolöre sıcaklık verilerinin iletimi NodeMCU ESP8266 modülü sayesinde internet erişimiyle sağlanmaktadır.

Kontrol sisteminin kullanıcı isteklerine göre tepki vermesini sağlayan kontrolör birimi olan MSP432'de çalıştırılan algoritma akış diyagramı Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Gelen veri paketine göre kontrolörde çalıştırılan akış diyagramı  
Figure 10. Flow diagram operated on controller according to incoming data packet



Şekil 11. Adafruit ekranında ev ortamından çekilen CO2 ölçüm verileri ve grafiği  
Figure 11. CO2 measurement data and graph from home environment on Adafruit screen

```

78 void makeHttpRequest() // OWM'den veri istemek için
79 {
80 // müşterinin sunucusuyla bağlantı kurmasına izin vermek için yeni bir istek göndermeden önce herhangi bir bağlantıyı kapat
81 client.stop();
82
83 // başarılı bir bağlantı varsa:
84 if (client.connect(server, 80)) // VERİ çekmek için gerekli olan HTTP bilgileri (Sorgu) gönderilir.
85 {
86   client.println("GET /data/2.5/forecast?q=" + nameOfCity + "&APPID=" + apiKey + "&mode=json&units=metric&cnt=2 HTTP/1.1");
87   client.println("Host: api.openweathermap.org");
88   client.println("User-Agent: ArduinoWiFi/1.1");
89   client.println("Connection: close");
90   client.println();
91
92   unsigned long timeout = millis();
93   while (client.available() == 0) {
94     if (millis() - timeout > 5000)
95     {
96       Serial.println(">>> Client Timeout Oldu !");
97       client.stop();
98       return;
99     }
100   }
101
102   char c = 0;
103   while (client.available())
104   {
105     c = client.read();
106     if (c == '{')
107     {
108       startJson = true;
109     }
110   }
111 }

```

```

{"cod":"200","message":0.0078,"cnt":2,"list":[{"dt":1562760000,"main":{"temp":35.18,"temp_min":35.18,"temp_max":36.45,"pressure":1006.73,"sea_level":1006.73,"grnd_level":997.28,"humidity":23,"temp_kf":-1.27},"weather":[{"id":800,"main":"Clear","description":"clear sky","icon":"01d"}],"clouds":{"all":0},"wind":{"speed":7.46,"deg":301.485},"sys":{"pod":"d"},"dt_txt":"2019-07-10 12:00:00"}, {"dt":1562770800,"main":{"temp":33.7,"temp_min":33.7,"temp_max":34.65,"pressure":1005.89,"sea_level":1005.89,"grnd_level":996.86,"humidity":25,"temp_kf":-0.95},"weather":[{"id":800,"main":"Clear","description":"clear sky","icon":"01d"}],"clouds":{"all":0},"wind":{"speed":4.58,"deg":342.127},"sys":{"pod":"d"},"dt_txt":"2019-07-10 15:00:00"},"city":{"id":304827,"name":"Manisa","coord":{"lat":38.6155,"lon":27.4256},"country":"TR","population":243971,"timezone":10800}}

```

Şekil 12. Komut dizini ve Openweather API'dan gönderilen veri bulutu  
Figure 12. Command directory and data cloud sent from the Openweather API

Bu çalışmada ESP8266 denetleyicisi kullanılarak Weather API'sı olan "OpenWeather map" sitesinden hava durumu bilgileri çekilip ev ortamındaki Nextion dokunmatik ekranına aktarılmaktadır. Ekran üzerinden sıcaklık takibi yapılabilmekte ve mevsimsel sıcaklık değerinin 23 °C' nin altına düşmesi veya üstüne çıkması durumlarında ısıtma veya soğutma sistemleri otomatik olarak devreye girerek ev ortamı sıcaklık değerinde kararlılık sağlanmaktadır. Yukarıdaki Şekil 12'de Openweather API'dan veri çekmek için yazılan komut dizini ve sonucunda kontrolöre gönderilen veri bulutu gösterilmiştir.

## ÇALIŞMA BULGULARI

İnternet üzerinde akıllı ev otomasyon çalışması kapsamında sistemin uygulanabilirliği ev maketi ortamında araştırılmıştır. Ev ortamındaki verilerin düzenli olarak Adafruit IO' da depolanması sağlanmıştır. Bu kapsamda sistem geçmişe dönük ve sürekli güncel bir şekilde rahatlıkla takip edilebilmektedir.

Şekil 13'deki sıcaklık değişimine ait grafik, önce ısıtma elemanı peltierin daha sonrada fanın devreye alınmasıyla çizdirilmiştir. Nem grafiği ise bahçe sulaması yapılarak toprak nem sensörü tarafından ölçülen nemin 70 değerine ulaşmasıyla elde edilmiştir.





Şekil 13. Adafuit IO'da grafiklerin görüntülenmesi  
Figure 13. Displaying graphics in Adafuit IO

Sistem her ne kadar Openweather üzerinden mevsimsel sıcaklık değerlerinin çekilmesi için tasarlanmış olsa da veri trafiğinde gecikmeler yaşanabilmektedir. Bu yüzden Şekil 14'te verilen sistem tepkisini görebilmek amacıyla sıcaklık değerleri, Manisa ilinin mevsimsel sıcaklıklarını referans alan bir dosyadan çekilmiştir.

```
SICAKLIK 23 IDEAL - ISITICI:OFF, HAVALANDIRMA:OFF, SULAMA POMPA:OFF
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 23
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 23
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 23
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 23
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 23
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 23
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 23
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 23
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 23
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 23
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 28
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 30
SICAKLIK 23'un USTUNDE - ISITICI:OFF, HAVALANDIRMA:ON, SULAMA POMPA:OFF
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 33
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 35
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 37
SICAKLIK 35'in USTUNDE - ISITICI:OFF, HAVALANDIRMA:ON, SULAMA POMPA:ON
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 36
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 36
SICAKLIK 35'in ALTINDA - ISITICI:OFF, HAVALANDIRMA:ON, SULAMA POMPA:OFF
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 35
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 33
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 32
, Manisa ili Sıcaklık Degeri: 31
```

Şekil 14. Mevsimsel sıcaklık değerlerine göre sistemin tepkisi  
Figure 14. System response according to seasonal temperatures.

## SONUÇLAR

Yapılan ev maketi uygulamasında çağın gerektirdiği teknolojik ve modern alt yapının kullanıcıya sağladığı imkânlar incelenmiş ve inşa edilen sistemin gerçek bir evde uygulanabilirliği kanıtlanmıştır.

Daha önce yapılmış akıllı ev uygulamalarında sistemin verimini, kullanılan mikrokontrolörün (denetleyicinin) belirlediği tespit edilmiştir. O yüzden modern bir ev modelini uyguladığımız ev maketinde sistemin verimini maksimumda tutabilmek için Texas Instruments'ın piyasaya yeni sürmüş olduğu düşük güç tüketimi ve ARM Cortex 32 Bit mimari tabanlı performansıya öne çıkan MSP432 mikrokontrolörü kullanılmıştır. MSP432 mikrokontrolör özelliklerinin önceki çalışmalarda kullanılan işlemcilerin özelliklerinden daha üstün olduğu Tablo 1 'de görülmektedir.

Tablo 1. MSP432 ile referans gösterilen çalışmalarda ki işlemcilerin karşılaştırılması  
Table 1. MSP432 between processors of references studies.

	Mevcut Çalışma	[2]	[3]	[9]	[17]
<b>İşlemci</b>	Arm Cortex 32 Bit MSP432	Pic 16F84	Pic 16F876	Arduino Mega 2560	AT Mega 328P
<b>Çalışma Hızı</b>	48 MHz	20 MHz	20 MHz	16 MHz	20 MHz
<b>Hafıza (SRAM)</b>	64 KB	68 byte	368 byte	8 KB	2KB
<b>Flaş Bellek</b>	256 KB	1.75 KB	14 KB	256 KB	32 KB
<b>Çalışma Voltajı</b>	1.62-3.7 V	2-5.5 V	2-5.5 V	7-12 V	1.8-5.5 V
<b>Aktif Güç Tüketimi</b>	80 µA	2 mA	0.6 mA	40 mA	0.24 mA
<b>Pasif Güç Tüketimi</b>	25 nA	0.5 µA	1 µA	2 mA	0.2 µA
<b>Giriş/Çıkış Pinleri</b>	100 I/O	18 I/O	28 I/O	70 I/O	59 I/O

Sistemin kablosuz haberleşmesi sayesinde kablo masrafı olmadığı gibi kablo kalabalığından da ev ortamı arındırılmış ve

böylece kablo montajı için duvar kazısı, sabitlenmesi ve sıva, .vb. gibi işlere de gerek kalmamaktadır. Bu çalışmada hem farkındalık yaratmak hem de geleceğe yönelik hiçbir dış faktör müdahalesi gerektirmeyen tam otomasyon sistemlerine örnek teşkil etmesi için ev ortamındaki sıcaklık ve bahçe sulama parametreleri mevsimsel sıcaklıklara göre kontrol edilebilmesi sağlanmıştır. Ayrıca yine kullanıcı konforu düşünülerek bakıma muhtaç veya yatağa bağımlı bir bireyin herhangi bir sağlık sorunu ile karşılaşabilme senaryosu üzerinde durulmuş ve bu durumun en az kayıpla atlatılması sağlanmıştır.

Teknolojinin ilerlemesiyle ve insan hayatını kolaylaştıracak yeni orijinal fikirlerin bulunmasıyla akıllı ev otomasyonları daha da iyileşecek ve mevcut sorunlara çözümler bulunacaktır. Kullanıcının isteklerini şahsi olarak girmesi yerine biyomedikal cihazlarla isteklerinin tespiti ve sistemin otomatik olarak bu taleplere cevap vermesi ilerleyen yıllarda yeni araştırma konusu olabilir. Örneğin kullanıcının vücut ısısının akıllı kol saatiyle ölçülüp ihtiyaç duyduğu ısıya göre bulunduğu oda sıcaklığının ayarlanması gibi. Günümüzde kısmi olarak yapılabilen akıllı ev otomasyonlarının gelecek yıllarda tam otomasyonlu sistemlere dönüşeceğine hiç şüphe yoktur.

## KAYNAKLAR

- [1] A. Ghaffarianhoseini, U. Berardi, H. Alwaer, S. Chang, E. Halawa, D. Clements-Croome, "What is an intelligent building Analysis of recent interpretations from an international perspective" *Architectural Science Review*, vol. 59, no 5, pp. 338-357, 2016.
- [2] M. Gedikpınar, M. Cavaş, "Pic16F84 Mikrodenetleyici ile Akıllı Ev Otomasyonu", *Otomasyon Dergisi*, Sayı 153, Sf. 168-171, 2005.
- [3] B. Yuksekkaya, A. Kayalar, M. B. Tosun, M. K. Ozcan, A. Z. Alkar, "A GSM, internet and speech controlled wireless interactive home automation system", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 52, no 3, pp. 837-843, 2006.
- [4] S. O. Tosunoğlu, "Akıllı Ev Sistemlerinde Merkezi Veri Toplama ve Cihaz Yönetimi", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009.
- [5] K. İnan ve M. A. Akçayol, "GSM Tabanlı Akıllı Ev Uygulaması", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, Sayı 2, Sf. 2, 2009.
- [6] B. Cincirop, "Gsm Kontrollü Akıllı Ev Otomasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi, Sakarya, 2009.
- [7] İ. Çayırhoğlu, S. Görgünoğlu, "Mobil telefon ve PIC mikrodenetleyici kullanarak uzaktan esnek kontrol sağlanması", *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, Sayı 2, Sf. 23-27, 2010.
- [8] Y. Y. Kardaş, M. S. Özerdem, "Gsm kontrollü akıllı ev uygulaması", *DÜMF Mühendislik Dergisi*, Sayı 6, Sf. 9-18, 2015.
- [9] G. Başol, R. Güntürkün, E. Başol, "Smart Home Design and Application", *World Wide Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 3, no 6, pp. 53-58, 2017.
- [10] K. Çetin, "Home automation", Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2007.
- [11] G. N. Güğül, "Akıllı Ev Sistemleri ve Uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [12] O. Tosunoğlu, M. Göktürk, "Akıllı Ev Sistemlerinde Ethernet Üzerinden Cihaz Kontrolü Ve İzlenmesi", *Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı*, 2008, Bursa.
- [13] A. Özkaya, "Mini Bilgisayar Kullanılarak İnternet Tabanlı Ev Otomasyonu Uygulaması", Yüksek Lisans Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
- [14] İ. Yabanova, S. Taşkın, H. Ekiz, H. Çimen, "Denetleyici Alan Ağı Üzerinden Mekatronik Bir Sistemin Kontrolü", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Sayı 7, Sf. 63-72, 2010.
- [15] L. Birgül, "Ev Otomasyonunun Bilgisayar Arayüzü İle Gerçekleştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [16] D. Dang, D. J. Pack, S. F. Barrett, "Embedded Systems Design with the Texas Instruments MSP432 32-bit Processor", *Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems*, vol. 11, no 3, pp. 1-574, 2016.
- [17] D. R. Patnaik Patnaikuni, "A Comparative Study of Arduino, Raspberry Pi and ESP8266 as IoT Development Board", *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, vol. 8, no 5, pp. 2350-2352, 2017.
- [18] H. Korkmaz, A. Durmaz, "Bitkilerin Abiyotik Stres Faktörlerine Verdiği Cevaplar", *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Sayı 7, Sf. 192-207, 2017.
- [19] Ö. Sine, "İnternet Üzerinden Akıllı Ev Otomasyon Uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 2019.

## Kablosuz Algılayıcı Ağlarında Heterojen Hibrid Kümeleme Modeli

### *Heterogeneous Hybrid Clustering Model in Wireless Sensor Networks*

Sercan YALÇIN<sup>1\*</sup>, Ebubekir ERDEM<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23119, Türkiye, ORCID: 0000-0003-1420-2490, [svancin@firat.edu.tr](mailto:svancin@firat.edu.tr)

<sup>2</sup> Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23119, Türkiye, ORCID: 0000-0001-7093-7016, [aberdem@firat.edu.tr](mailto:aberdem@firat.edu.tr)

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*

Geliş: 24 Ocak 2020  
Düzeltilme: 10 Mart 2020  
Kabul: 28 Mart 2020

*Anahtar kelimeler:*

Enerji verimliliği, kablosuz algılayıcı ağları, kümeleme modeli, veri toplama

#### ÖZET

Algılayıcı düğümlerinin sınırlı batarya kaynakları ve fiziksel verileri algılama sürelerinin kısa oluşundan dolayı, ağ ömrünü artırmak için enerji verimli yönlendirme protokolleri geliştirmek, kablosuz algılayıcı ağlarında (KAA) en önemli stratejilerden biridir. Yönlendirme stratejisine paralel olarak tasarlanan kümeli heterojen ağ protokolleri, algılayıcı ağında topoloji kontrolü, enerji tüketimi ve veri toplama açısından son derece etkilidir. Bu makalede, enerji verimli üç-seviyeli heterojen kümeleme yöntemi önerilmiştir. Çoğu diğer çalışmaların aksine, bu çalışmada enerji tüketim modelinde ve küme başı (KB) seçiminde SEED (Sleep-aware Energy Efficient Distributed, Uyku-farkındalı Enerji Verimli Dağıtık Protokol) ve EDEEC (Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering, Gelişmiş Dağıtılmış Enerji Verimli Kümeleme Protokolü)'in avantajlarından yararlanılmış, üç seviyeli bir hibrit yaklaşım benimsenmiştir. Önerilen model, EDEEC ve SEED ile ağdaki yaşayan düğümler, baz istasyonuna (BS) gönderilen paket sayısı ve ortalama KB sayısı olmak üzere kalite ölçütlerine göre farklı senaryolarla Matlab 2019a programı kullanılarak çeşitli benzetimlerle kıyaslanmıştır. Benzetim sonuçları, önerilen modelin diğer iki protokolden daha iyi sonuçlar verdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Doi: 10.24012/dumf.679533

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 24 January 2020  
Revised: 10 March 2020  
Accepted: 28 March 2020

*Keywords:*

Energy efficiency, wireless sensor networks, clustering model, data collection

#### ABSTRACT

Due to the limited battery resources of sensor nodes and the short sensing time of physical data, developing energy efficient routing protocols to increase network life is one of the most important strategies in wireless sensor networks (WSN). Clustered heterogeneous network protocols designed in parallel with the routing strategy are highly effective in terms of topology control, energy consumption and data collection in the sensor network. In this article, an energy efficient three-level heterogeneous clustering method is proposed. Unlike most other studies, in this study, the advantages of Sleep-aware Energy Efficient Distributed, SEED) and Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering, EDEEC) are utilized, and a hybrid approach is adopted in the energy consumption model and cluster head (CH) selection. The proposed model was compared with EDEEC and SEED protocols using Matlab 2019a program with different simulation scenarios based on quality criteria, including the living nodes in the network, the number of packets sent to the base station (BS) and the average number of CHs. The simulation results make it clear that the proposed model gives better results than the other two protocols.

\* Sorumlu yazar / Correspondence

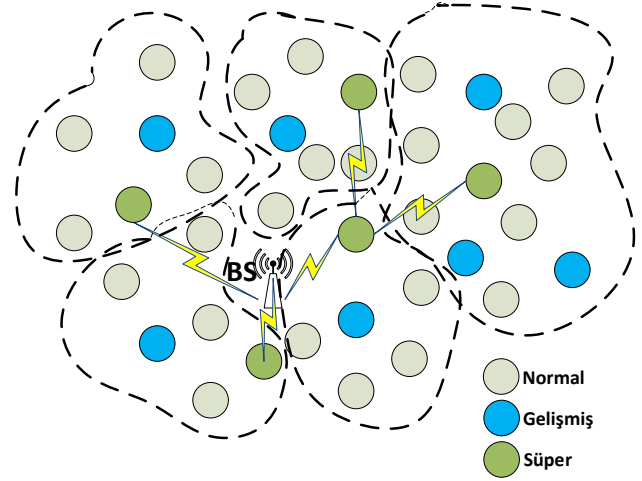
Sercan Yalçın

✉ [svancin@firat.edu.tr](mailto:svancin@firat.edu.tr)

## Giriş

Kablosuz algılayıcı ağlar (KAA), veri algılama, hesaplama ve kablosuz kanal iletişim yetenekleri sayesinde veri iletimi yapabilen küçük boyutlu algılayıcı düğümleri içerir [1-3]. KAA'lardaki önemli problemlerden biri algılayıcı düğümlerindeki pil gücünün sınırlı olmasıdır. Dolayısıyla, KAA'lardaki çalışma konularında yönlendirme protokolleri önemli bir alandır. Algılayıcı düğümlerinin ömrünün artırılmasına ilaveten, var olan enerjiyi KAA'ya dengeli olarak dağıtmak da arzu edilen amaçlar arasındadır. Algılayıcı düğümlerdeki sınırlı güç kaynağı nedeniyle, enerjinin mümkün olduğunca daha az tüketilmesi KAA'larda önemli görev teşkil etmektedir. Veriler algılayıcı düğümleri üzerinden diğer düğümlere iletilirken maksimum enerji kullanılır [4-6]. Bütün bu sebeplerden ötürü bir algılayıcı ağı ömrünü uzatmak hedefli yönlendirme algoritmaları geliştirmek için bir dizi araştırma yapılmıştır. Algılayıcı ağlarının ömrünü uzatmak için algılayıcı ağlarının enerji tasarrufu ve ölçeklenebilirliği sağlayarak algılayıcıların ortak çalışması prensibine kümeleme denilmektedir. Bu anlamda KAA'daki düğümler kümelere ayrılarak işbirliği içerisinde çalışırlar [7]. Bir küme içerisinde küme lideri olarak bir küme başı (KB) ve üye düğümler bulunmaktadır. Üye düğümler ait oldukları KB'lere çevreden topladıkları verileri tek-atlamalı veya çok-atlamalı tutumla gönderirler. KB'ler elde ettikleri toplam verileri baz istasyonuna (BS) teslim ederler. Sonuç olarak Şekil 1'deki gibi bir ağ döngüsü oluşmuş olur. Şekil 1'de normal, gelişmiş ve süper düğümler olmak üzere 3 seviyeli kümeli ve heterojen ağ modeli verilmiştir.

KAA'lar homojen ve heterojen ağlar olmak üzere iki tür ağ modeline sahiptir. Homojenlik, KAA'larda algılayıcı düğümlerinin hem fiziksel hem de yazılımsal özelliklerinin aynı olması anlamına gelmektedir. Heterojenlik ise, ağ düğümlerinin birbirinden farklı olmasıdır. Genellikle araştırmacılar, heterojenliği düğüm enerji seviyelerinin farklı olmasında kullanırlar. Homojen tabanlı algoritmalar enerji tüketimi ve yayılımı, KB seçimi gibi konularda çok verimli çalışmadığından dolayı heterojen KAA'lar geliştirilmiştir.



Şekil 1. Kümeli heterojen ağ yapısı

Figure 2. A clustered heterogeneous network structure

Bu çalışmada, üç seviyeli heterojen KAA için bir kümeleme yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntem EDEEC (Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering, Gelişmiş Dağıtılmış Enerji Verimli Kümeleme Protokolü) [8] yöntemindeki gibi üç seviyeli KB seçim olasılık parametresi ve enerji modeline sahiptir. Aynı zamanda, SEED (Sleep-aware Energy Efficient Distributed, Uyku-farkındalı Enerji Verimli Dağıtık Protokol) [9] protokolündeki gibi uyku-farkındalı veri iletimi ve alımı modeline sahiptir. Aslında önerilen yöntem, bu iki protokollerin üstün yönlerini kullanan bir hibrit tekniği esas almaktadır. Önerilen yöntem, EDEEC ve SEED protokolleriyle performans karşılaştırması yapılmıştır.

## İlgili Çalışmalar

KAA'lar için literatürde birçok kümeleme algoritmaları önerilmiştir.

Bu algoritmalarından en eski olanı LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, Düşük Enerji Uyarlamalı Kümeleme Hiyerarşisi) [10], ağ içerisine rastgele dağıtılan algılayıcı düğümlerden rastgele bir KB seçerek kümeleme yapısı oluşturur. KB'ler tek-atlamalı veya çok-atlamalı yönlendirmeye diğer düğümlerden topladıkları verileri BS'ye iletir.

Bir çalışmada, Lindsey ve Raghavenda [11] LEACH'in bir gelişmiş ve zincir temelli bir protokol olan PEGASIS'i (sensör bilgi

sistemlerinde güç verimli toplama) önermiştir. PEGASIS'te, her bir düğüm sadece yakın bir komşu ile iletişim kurar ve BS'ye sırasıyla verileri iletir, böylece tur başına harcanan enerji miktarını azaltır.

Bir çalışmada, Singh vd. [12] LEACH tabanlı yeni bir yönlendirme algoritması önermiştir. Bu algoritmanın kümeleme mekanizmasında optimizasyon yöntemi kullanılmaktadır.

Bir çalışmada, Younis ve Fahmy [13], HEED (Hibrid Enerji-Verimli Dağıtılmış kümeleme) protokolünü önermiştir. Bu protokole göre, KB'ler, düğümlerin kalan enerjisi, komşuları veya düğüm derecesi gibi ikincil bir parametreye göre periyodik olarak seçilmektedir. HEED, düşük mesaj yükü oluşturur ve ağ genelinde oldukça eşit KB dağıtımını gerçekleştirir.

Bir çalışmada, Smaragdakis vd. [14], algılayıcı ağından geri bildirim güvenilir olması gereken birçok uygulama için çok önemli olan ilk düğümün ölümünden önceki zaman aralığını uzatmak için (kararlılığı artırmak için) SEP adında, heterojen farkındalı bir protokol önermiştir. SEP, her bir düğümde kalan enerjiye göre her düğümün ağırlıklı seçim olasılıklarına dayanan bir KB seçim algoritması sunmaktadır.

Bir çalışmada, Quing ve Zhu [15], DEEC adı verilen heterojen KAA'lar için yeni bir dağıtılmış enerji tasarruflu kümeleme şeması önermiştir. DEEC'de KB'ler, her bir düğümün kalan enerjisi ile ağırlıklı ortalama enerjisi arasındaki orana dayalı bir olasılıkla seçilir. Düğümler için KB olma dönemleri başlangıç ve kalan enerjilerine göre farklıdır. DEEC protokolünü iki seviyeli heterojen ağ modeli ile sunmuşlardır. Ancak araştırmacılar bu protokolü çok-seviyeli olarak geliştirmişlerdir.

Bir çalışmada, Saini ve Sharma [8], ağın ömrünü ve kararlılığını artırmak için üç tip düğüm için DEEC türevli EDEEC protokolünü önermiştir. Bu algoritma, ağın heterojenliğini ve enerji seviyesini artırır. Daha sonraları araştırmacılar [16-17], DEEC türevli üç seviyeli heterojenliği destekleyen birçok protokol sunmuşlardır.

Bir çalışmada [9], yazarlar SEED olarak adlandırılan Uyku-Uyanık Enerji Verimli Dağıtılmış kümeleme ve yönlendirme protokolü

önermiştir. Bu protokolde, ağ algılama alanını üç enerji bölgesine bölünür, çünkü SEED protokolünde KB'ler BS'yle doğrudan iletişim kurar. Yüksek enerji bölgesinin KB'leri, BS ile daha uzun bir mesafeden iletişim kurar ve düşük enerji bölgesinin KB'lerine kıyasla ekstra enerji maliyetine sebebiyet verir.

Bir çalışmada [18], (Vançin ve Erdem, 2017), SEED (uyku-uyanık enerji dengeli dağıtılmış) algoritması, homojen algılayıcı ağları için LEACH, mod-LEACH ve PEGASIS ve heterojen algılayıcı ağları için SEP, DEEC ve CEEC gibi kümeleme yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

Bir çalışmada [2], yazarlar enerji etkin üç seviyeli heterojen kümeleme yöntemi (DEEC) tabanlı dağıtık enerji verimli kümeleme protokolü önerilmiştir. Çoğu diğer çalışmaların aksine, bu çalışmada enerji tüketim modelinde örneklemeli denge tabanlı eşik değerinin etkisini göz önüne alınmaktadır.

Bir çalışmada, Gambhir vd. [19] KAA için yapay arı koloni algoritması tabanlı kümeleme yöntemi önermiştir.

## Materyal ve Yöntem

Önerilen yaklaşım, SEED protokolü temelli veri iletimi, alımı ve toplanmasını esas almaktadır. KB seçimi için harcanan enerji bakımından SEED protokolünü benimserken üç seviyeli heterojen KB seçim olasılığının belirlenmesi bakımından ise EDEEC protokolüne benzemektedir. Bu bakımdan önerilen yöntem, hibrid bir protokoldür.

KAA'da dağıtılan algılayıcı düğümleri aynı verileri BS'ye iletebilmektedir. Bu şekilde alıcı düğümde (BS) fazlalık veriler oluşabilmektedir. Bu sorunu çözmek için, bu yönlendirme protokolünde iki veya daha fazla algılayıcı düğümü aynı uygulama tarafından ve birbirinin iletim aralığında alt kümeler oluşturur. Bir alt kümede, yalnızca bir algılayıcı düğümü uyanık olur ve KB'ye veri elde edilen yönlendiriciler ve algılayıcı düğümlerinin geri kalanı pil kaynaklarını korumak için uyku modunda kalır. Bu şekilde uyanık modlu veri iletim ve toplama işlemi gerçekleştirilerek enerji tüketimi ve veri çakışma olasılığı azaltılmış olur [2,9]. Önerilen

model, bahsedilen tüm protokollerle karşılaştırıldığında büyük bir veri iletim gücüne sahiptir.

### Önerilen Yöntemin Kurulum Fazı

Algılayıcı ağının kurulum aşamasında, her algılayıcı düğümü komşularına uyarı mesajını iletir. Bu uyarı mesajları *dugum\_id*, uygulama türü, komşu sayısı ve konumunu içerir. Bu anlamda, tüm algılayıcı düğümleri yönlendirme tablolarını kaydeder ve uygulama türüne ve iletişim aralığına bağlı olarak alt kümeleri oluşturur.

### Önerilen Yöntemin Ağ ve Enerji Modeli

Önerilen yöntem, EDEEC protokolü ile benzer heterojen ağ yapısına sahip olup KB seçimi ve bu işlem için harcanan enerji modeli olarak ise SEED protokolüne benzemektedir.

Heterojen KAA'lar, enerji seviyeleri, donanım yapısı ve diğer özel özelliklerle ilgili olarak iki, üç veya çok sayıda algılayıcı düğümünden oluşabilir ve sırasıyla iki, üç veya çok düzeyli dağıtık heterojen KAA olarak tanımlanabilir [8,9].

Önerilen protokol, algılayıcı düğümlerinin normal, gelişmiş ve süper batarya seviyesine sahip olduğu düşünülen üç seviyeli heterojen KAA'yı esas almaktadır. Ancak önerilen yöntem için çok-seviyeli heterojenlik de düşünülebilir.  $E_0$ ,  $E_0(1+a)$  ve  $E_0(1+b)$  sırasıyla normal, gelişmiş ve süper algılayıcı düğümünün başlangıç enerjisini ifade etmektedir. Gelişmiş düğümün normal düğümlerden, gelişmiş düğümlerin de süper düğümlerden kaç kat fazla enerjiye sahip olduğunu sırasıyla  $a$  ve  $b$  katsayıları belirlemektedir. Düğümlerin toplam enerjileri hesaplanırken  $f$ ,  $f_0$  ve  $f_1$  kesir katsayıları dikkate alınmalıdır.  $N$ , ağdaki toplam düğüm sayısı olduğu için ağdaki normal, gelişmiş ve süper düğümlerin sayıları sırasıyla  $N_{nml}$ ,  $N_{ad}$  ve  $N_{sup}$  olmaktadır.

KAA'daki normal düğümlerin toplam ilk enerjisi  $E_{nml}$  denklem (1)'de verilmiştir.

$$E_{nml} = N_{nml}(1-f)E_0 \quad (1)$$

KAA'da gelişmiş düğümlerin toplam ilk enerjisi  $E_{ad}$  denklem (2)'de verilmektedir.

$$E_{ad} = N_{ad}(1-f_0)E_0(1+a) \quad (2)$$

KAA'da süper düğümlerin toplam ilk enerjisi  $E_{sup}$  denklem (3)'de verilmektedir.

$$E_{sup} = N_{sup}(1-f_1)E_0(1+b) \quad (3)$$

Böylece, üç seviyeli heterojen KAA'ların toplam ilk enerjisi denklem (4)'te verilen şekildeki gibi hesaplanır.

$$E_{total} = E_{nml} + E_{ad} + E_{sup} \quad (4)$$

KB, algılayıcı düğümleri ve diğer üye düğümlere kıyasla daha fazla enerjiyi tüketir. Birçok turdan sonra, tüm algılayıcı düğümlerinin enerji seviyesi birbirine kıyasla değişir. Bu nedenle, heterojenliği işleyen bir kümeleme ağ protokolü, homojen ağ protokolünden daha önemlidir [2,8].

Bir algılayıcı düğümünün enerji tüketmesi, toplanan verilerin algılanması, işlenmesi ve kablosuz iletişim gibi özel işlevleri yerine getirebilmesi için enerji tüketimini göz önünde bulunduran modelleri ihtiva eder. Bu modeller enerji tüketim hesaplamaları yapmakla sorumludur. Önerilen model için, KB seçimi yapılırken ağın ortalama enerjisine ilave olarak düğümlerin başlangıç ve kalan enerjisine bağımlı olasılıklar fikrini içerir. Ağın  $r$ .tur için ortalama enerjisi denklem (5) olarak verilir.

$$E_{avg} = \frac{1}{N}E_{total}(1 - \frac{r}{R}) \quad (5)$$

$R$ , ağ ömrü boyunca toplam tur sayısını belirtir ve denklem (6) olarak verilir.  $E_{round}$  ise her tur için harcanan enerjiyi ifade eder.

$$R = \frac{E_{total}}{E_{round}} \quad (6)$$

$E_{round}$ , tek bir tur sırasında bir algılayıcı ağında tüketilen enerji olup denklem (7) olarak verilir.

$$E_{round} = k_{opt}(2NE_{elec} + NE_{DA} + le_{amp}d^4(BS) + Ne_{fs}d^2(KB)) \quad (7)$$

$E_{elec}$ , düğümün elektronik olarak verici veya alıcıyı çalıştırmak için bit başına enerji tüketimini,  $e_{fs}$  ve  $e_{amp}$  sırasıyla boş alan ve çoklu yol için radyo amplifikatörünü türlerini ifade eder.  $k_{opt}$ ,  $E_{DA}$ ,  $d(BS)$ ,  $d(KB)$ , sırasıyla, optimum küme sayısı, küme yarıçapı, KB tarafından tüketilen veri toplama enerjisinin

maliyeti, KB ve BS arasındaki ortalama mesafe ve küme üyeleri ile KB arasındaki ortalama mesafeyi ifade etmektedir [8,9,18] (Denklem 8,9).

$$d(KB) = \frac{M}{\sqrt{2\pi}} \quad (8)$$

$$d(BS) = 0.765 \frac{M}{2} \quad (9)$$

Optimum küme sayısı  $k_{opt}$ , denklem (10)'daki gibi bulunur.

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{N}{2\pi}} d_0 \frac{M}{d^2(BS)} \quad (10)$$

Referans mesafesi  $d_0$ , denklem (11) olarak hesaplanır.

$$d_0 = \sqrt{\frac{e_{fs}}{e_{amp}}} \quad (11)$$

Önerilen modelde KB seçimi için olasılıklar, denklem (12) 'de verilmektedir.  $E_i(r)$ ,  $i$ . düğümün kalan enerjisini ifade etmektedir. Ayrıca çok-seviyeli heterojen ağ modelindeki KB seçim olasılığı denklem (13)'deki gibi verilebilir [9,18].

$$p_i = \begin{cases} \frac{E_i(r)E_0 p_{opt}}{E_{avg}E_{total}} & \text{normal düğüm için (eğer } E_i(r) > T_{limit} \text{)} \\ \frac{E_i(r)E_0 p_{opt}(1+a)}{E_{avg}E_{total}} & \text{gelişmiş düğüm için (eğer } E_i(r) > T_{limit} \text{)} \\ \frac{E_i(r)E_0 p_{opt}(1+b)}{E_{avg}E_{total}} & \text{süper düğüm için (eğer } E_i(r) > T_{limit} \text{)} \end{cases} \quad (12)$$

$$p_{coklu} = \frac{p_{opt} + N(1+a_i)}{(N + \sum_{i=1}^N a_i)} \quad (13)$$

### Küme Başı Seçimi

Kurulum aşamasından sonra, her algılayıcı düğümü kendisini o anki tur için bir KB adayı olarak belirler. Bu belirleme  $i$ . düğüm tarafından sağlanır. 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı seçilir. Seçilen sayı  $T(K_i)$  eşliğinden düşük olduğunda,  $i$ . düğüm geçerli tur için bir KB olur. Önerilen yöntemdeki tüm algılayıcı düğümleri boyunca homojen enerji tüketimi sağlamak için, KB'ler algılayıcı düğümlerinin kalan ve ortalama enerjisini temel alan denklem (12)'ye göre seçilir.  $T(K_i)$  eşik seviyesi denklem (14)'deki gibi seçilir [8,9,18].

$G$ , KB seçimi uygun düğüm grubunu içerir, Herhangi bir enerji alanından bir KB tarafından

tüketilen enerji, denklem (15)'de olduğu gibi hesaplanır.

$$T(K_i) = \begin{cases} \frac{p_i}{1-p_i \left( \text{mod} \left( r, \frac{1}{p_i} \right) \right)} & \text{eğer normal düğüm } \in G \\ \frac{p_i}{1-p_i \left( \text{mod} \left( r, \frac{1}{p_i} \right) \right)} & \text{eğer gelişmiş düğüm } \in G \\ \frac{p_i}{1-p_i \left( \text{mod} \left( r, \frac{1}{p_i} \right) \right)} & \text{eğer süper düğüm } \in G \end{cases} \quad (14)$$

$$E_{ch} = lE_{elec} \left( \frac{N_{nml} + N_{ad} + N_{sup}}{k_{opt}} - 1 \right) + le_{amp} d^4(BS) \quad (15)$$

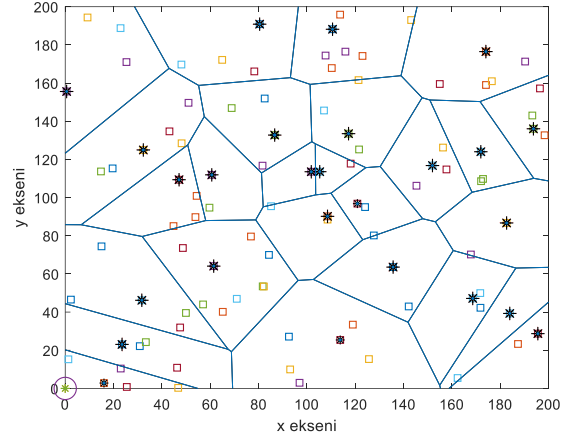
### Benzetim Kurulumu

Bu çalışmada üç seviyeli heterojen KAA'lar için EDEEC ve SEED yöntemlerini avantajlarından yararlanılarak enerji-verimli kümeleme yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem, EDEEC ve SEED protokolleriyle performans kıyasına tabi tutulmuştur. Performans analizleri MATLAB R2019a programlama kullanarak çeşitli benzetimlerce sonuçlandırılmıştır. KAA oluşturulurken,(0,0) merkezli olarak konumlanmış bir BS ile  $200 \times 200 m^2$  ve  $500 \times 500 m^2$  boyutunda bir ağ alanına 100 ile 500 düğüm arasında değişen algılayıcı düğümleri rastgele dağıtılmıştır. Bu senaryoların amacı hem ağ yoğunluğunun hem de ağ boyutunun performansa etkisinin ölçülmesidir. Tüm algılayıcı düğümlerinin sabit konumda olduğu ve tüm düğümlerin sinyalleri arasındaki bozulma nedeniyle enerji kaybı olmadığı varsayılmıştır. Tüm benzetimlerde, benzetim şartları eşit olması açısından Tablo 1'deki parametreler kullanılmıştır. Örnek olarak, senaryolarda 100 düğümlü ve  $200 \times 200 m^2$  ağ alanında önerilen modele göre oluşan heterojen kümeli ağ yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'den de görüldüğü üzere BS, (0,0) konumunda bulunmaktadır. Her bir kümede yıldızlı olarak tasvir edilen bir KB düğüm bulunmaktadır. Diğer düğümler de normal düğümleri temsil etmektedir. Tur sayısı arttıkça düğümlerin enerjileri azaldığından dolayı farklı renklerle gösterilmektedir. Şekil 3 ise Şekil 2'deki ağın kuşbakışı olarak görüntüsünü vermektedir. Kuşbakışı görüntü uzaktan izleme ve takip etme gibi birçok amaç için kullanılabilir.

Tablo 1. Benzetim parametreleri

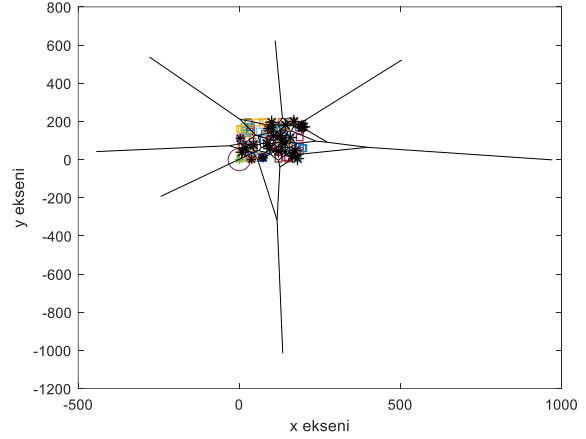
Table 1. Simulation parameters

Parametre tipi	Sembol	Değer
Amplifikatörün enerji tüketmesi (Kısa mesafe)	$e_{fs}$	10nJ/bit /m <sup>2</sup>
Amplifikatörün enerji tüketmesi (Uzak mesafe)	$e_{amp}$	0.0013pJ /bit/m <sup>4</sup>
Sinyali iletmek veya almak için düğümün elektronik devresinin enerji tüketmesi	$E_{elec}$	50nJ/bit
Veri toplama enerjisi	$E_{DA}$	5nJ/bit /signal
Eşik uzaklık değeri	$d_0$	50m
İstenilen KB olma olasılığı	$p_{opt}$	0.2
Toplam tur sayısı	$R$	5000
Veri boyutu (bit)	$l$	5000
Ağ boyutu		250*250 m <sup>2</sup> 500*500 m <sup>2</sup>
Alıcı düğüm konumu		(0,0)
Toplam düğüm sayısı	$N$	100-500
Normal düğüm sayısı	$N_{nml}$	$N*55/100$
Gelişmiş düğüm sayısı	$N_{ad}$	$N*30/100$
Süper düğüm sayısı	$N_{sup}$	$N*15/100$
Düğüm dağıtımı		Rastgele
Küme yarıçapı	$M$	25 m
Normal düğümün başlangıç enerjisi	$E_0$	0.25J
Gelişmiş düğümlerin normal düğümlerden kaç katı enerjiye sahip olduğu	$a$	1
Süper düğümlerin normal düğümlerden kaç katı enerjiye sahip olduğu	$b$	2
Gelişmiş düğümlerin kesir katsayısı	$f_0$	0.005
Süper düğümlerin kesir katsayısı	$f_1$	0.006



Şekil 2. Birkaç turdan sonra kümeli heterojen ağ yapısı (100 düğüm için)

Figure 2. A clustered heterogeneous network structure after several rounds (for 100 nodes)

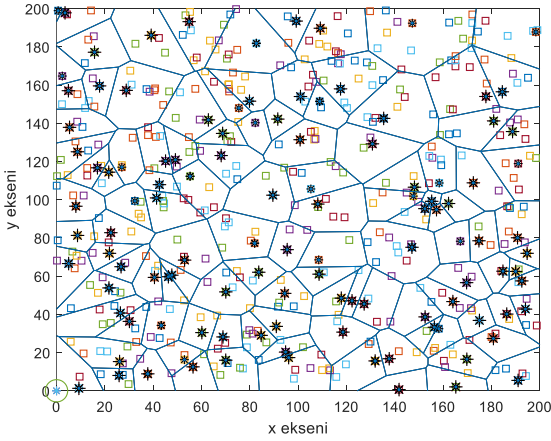


Şekil 3. Kümeli heterojen ağ yapısının kuşbakışı görünümü (100 düğüm için)

Figure 3. A panoramic view of the clustered heterogeneous network structure (for 100 nodes)

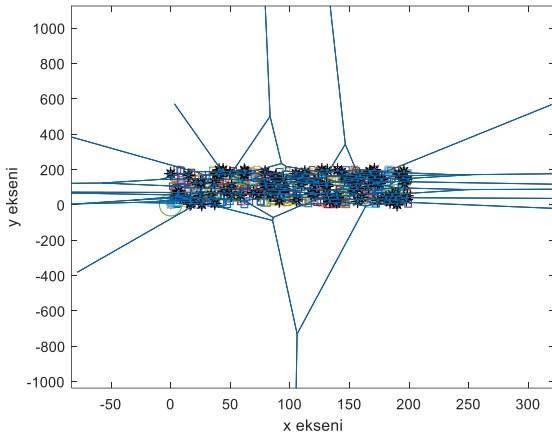
Şekil 4, 500 düğümlü ve  $200 \times 200 \text{ m}^2$  ağ alanında önerilen modele göre oluşan heterojen kümeli ağ yapısını göstermektedir. Buradaki amaç ise ağ yoğunluğu fazla olan ağların benzetimini yapmaktır. Şekil 5 ise Şekil 4'deki ağ yapısının kuşbakışı görünümünü sunmaktadır.





Şekil 4. Birkaç turdan sonra kümeli heterojen ağ yapısı (500 düğüm için)

Figure 4. A clustered heterogeneous network structure after several rounds (for 500 nodes)



Şekil 5. Kümeli heterojen ağ yapısının kuşbakışı görünümü (500 düğüm için)

Figure 5. A panoramic view of the clustered heterogeneous network structure (for 500 nodes)

### Benzetim Sonuçlarının İrdelenmesi

Bu bölümde çalışmada elde edilen benzetim sonuçları irdelenmiştir. Tüm yöntemlerin analizleri için kullanılan kalite performans metrikleri ağdaki canlı düğümler, KB'den BS'ye gönderilen paket sayısı ve ortalama KB sayısıdır.

### Ağdaki Canlı Düğüm Sayısının İrdelenmesi

Canlı düğümler metriği, tur sayısı arttıkça canlı düğümlerin sayısının ölçümüdür. Enerjisi biten düğümler ölür ve canlı düğüm sayısı azalır. Bu çalışmada, ağda canlı düğüm sayısının etkisi,

$200 \times 200 m^2$  ve  $500 \times 500 m^2$  ağ alanına sahip ağlar için iki farklı benzetim olarak gerçekleştirilmiştir. Bu benzetim sonuçları sırasıyla Şekil 6 ve 7'de verilmiştir. Şekil 6'da gözlemlendiği üzere, en uzun ağ ömrü 3060. turun üzerinde olarak önerilen yöntem çalıştırıldığında elde edilmiştir. Yani ağdaki 100 düğüm tamamen 3060. turdan sonra enerjisini yitirmiştir. Önerilen yöntem, SEED ve EDEEC yöntemleri çalıştırıldığında sırasıyla, ilk düğüm 1087, 1259 ve 1494. turda ölmektedir. Bu anlamda önerilen metod kıyaslanan algoritmalar arasında en iyi performans göstermiştir. Şekil 7'den de anlaşılacağı üzere, EDEEC, SEED ve önerilen yöntemle ilk düğüm sırasıyla 125, 235 ve 223. turda ölmüştür. Son düğüm ölümü ise önerilen ve SEED protokolünde benzer performans göstermiştir. Ancak önerilen yöntem EDEEC yönteminden daha iyi sonuç vermiştir. Şekil 6 ve 7'deki benzetim sonuçları kıyaslandığında ağ boyutu artınca ağ ömrünün azaldığı görülmektedir.

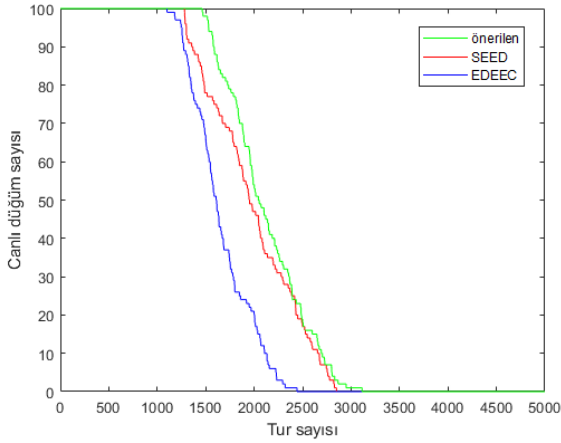
### KB'den BS'ye gönderilen veri paketi sayısının İrdelenmesi

Bu performans metriğiyle, KB'lerden BS'ye gönderilen toplam paket sayısı dikkate alınır. Şekil 8 ve 9, tur sayısına göre BS'ye iletilen toplam paket sayısını göstermektedir. Şekil 8'den de görüldüğü üzere önerilen yöntem, SEED ve EDEEC yöntemleri çalıştırıldığında BS'ye iletilen paket sayısı sırasıyla, yaklaşık  $10.5 \times 10^4$ ,  $7.3 \times 10^4$  ve  $3 \times 10^4$  dir. Bu anlamda en iyi paket teslimatı önerilen yöntemle sağlanmıştır. Şekil 9'dan da anlaşılacağı üzere ağ boyutu artınca paket teslimatı tüm protokoller için düşmektedir. Aslında hem tur sayısı hem de iletilen paket sayısı azalmaktadır.

### Ortalama KB sayısının İrdelenmesi

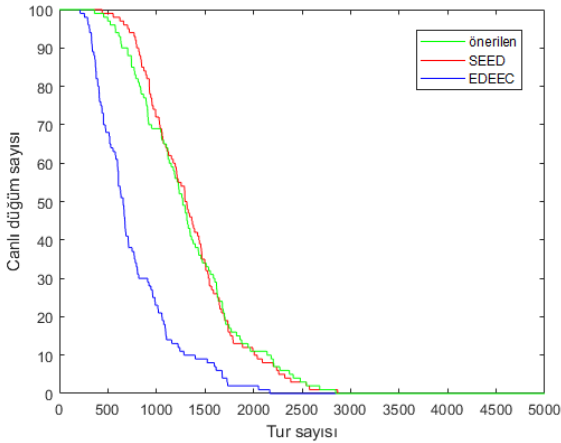
Bu performans metriği ile ortalama KB sayısının ölçülmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada, her senaryo için 50 benzetim gerçekleştirildiği için ortalama KB sayısını esas alınmaktadır. Şekil 10 ve 11, tur sayısına göre ortalama KB sayısını göstermektedir. 100 düğümlü bir ağda yaklaşık 22 adet KB düğümlü heterojen ağ yapısı olmasına rağmen canlı düğüm sayısı azaldıkça KB sayısı da azalmaktadır. Şekil 10'dan görüldüğü üzere, önerilen yöntem ile en yüksek

KB sayılı ve en uzun turlar için ağ ömrüne sahip KAA oluşmaktadır. Önerilen yöntem hibrid bir yaklaşım benimsediğinden ötürü, SEED ve EDEEC protokollerine göre üstün performans göstermektedir. Şekil 11'den de görüldüğü üzere ağ boyutu artınca tüm yöntemler için ortalama KB sayısı azalmaktadır. Şunu belirtmek gerekirse, ağdaki KB sayısı azalınca düğümler arasındaki uzaklık artacağından ötürü hem veri kaybı hem de verimlilik azalmaktadır.



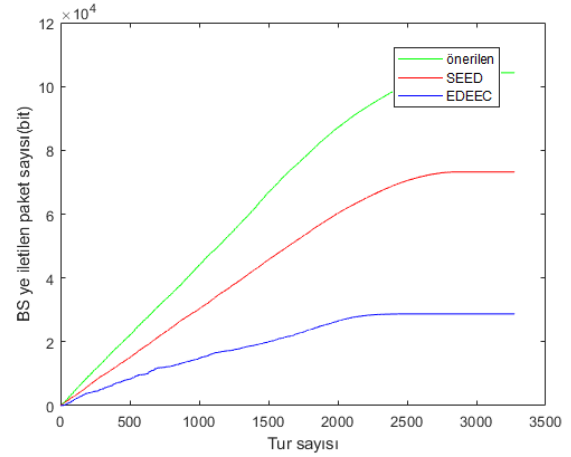
Şekil 6. Ağda canlı düğüm sayısı(200x200m<sup>2</sup>)

Figure 6. Number of live nodes in the network (200x200m<sup>2</sup>)



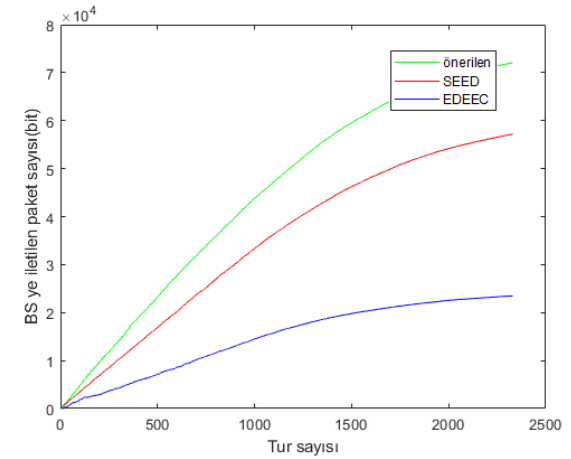
Şekil 7. Ağda canlı düğüm sayısı(500x500m<sup>2</sup>)

Figure 7. Number of live nodes in the network (500x500m<sup>2</sup>)



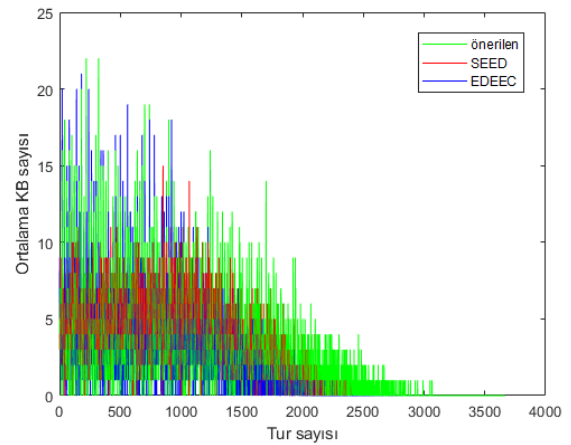
Şekil 8. BS'ye iletilen paket sayısı(200x200m<sup>2</sup>)

Figure 8. Number of packets forwarded to BS (200x200m<sup>2</sup>)



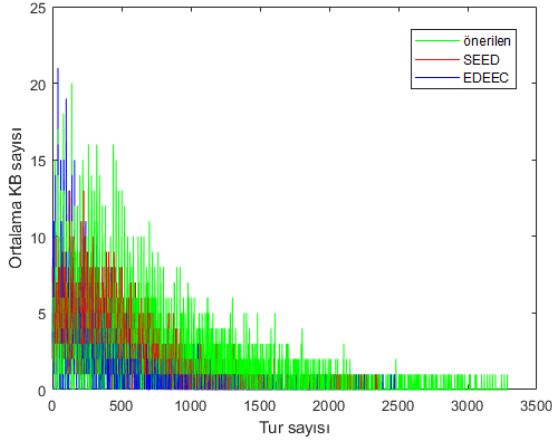
Şekil 9. BS'ye iletilen paket sayısı(500x500m<sup>2</sup>)

Figure 9. Number of packets forwarded to BS (500x500m<sup>2</sup>)



Şekil 10. Ortalama KB sayısı (200x200m<sup>2</sup>)

Figure 10. Average number of CHs (200x200m<sup>2</sup>)



Şekil 10. Ortalama KB sayısı ( $500 \times 500 m^2$ )

Figure 10. Average number of CHs ( $500 \times 500 m^2$ )

## Sonuç

Bu çalışmada, enerji-verimli heterojen KAA'larda hibrid kümeleme protokolü sunulmuştur. Önerilen bu protokol, EDEEC protokolü gibi bir üç seviyeli ağ modeline ve SEED protokolüne benzer bir veri iletim-toplama mekanizmasına sahiptir. Önerilen protokol, EDEEC ve SEED protokolleriyle performans kıyasına tabi tutulmuştur. Tüm protokoller, ağ ömrü boyunca canlı düğümler, BS'ye iletilen paket sayısı ve ortalama KB sayısı açısından analiz edilmiştir. Benzetim sonuçları, önerilen yöntemin, ilgili parametreler açısından diğer yöntemlere göre üstünlüğünü göstermektedir. Önerilen yöntem özellikle BS'ye iletilen paket sayısı bakımından diğer yöntemlerden iyi sonuçlar doğurmuştur. Bu anlamda, paket teslimatı daha verimli gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışmalarda, KAA'lar için çoklu mobil alıcı düğüm tabanlı heterojen yönlendirme ve kümeleme algoritmaları önerilmesi planlanmaktadır.

## Kaynaklar

[1] Vancin, S. and Erdem, E., (2017). Implementation of the vehicle recognition systems using wireless magnetic sensors. *Sadhana Springer*, **42(6)**, 841-854.  
 [2] Vancin, S., Erdem, E., (2018). Threshold Balanced Sampled DEEC Model for Heterogeneous Wireless Sensor Network, *Wireless Communication and Mobil Computing*, **6**, 1-12.  
 [3] Burrell, J., Brooke, T., Beckwith, R., (2014). Vineyard Computing: Sensor Networks in Agricultural Production. *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, **97(7)**, 9 – 16.

[4] Yalçın, S., Erdem, E., (2019). Bacteria Interactive Cost and Balanced-Compromised Approach to Clustering and Transmission Boundary-Range Cognitive Routing in Mobile Heterogeneous Wireless Sensor Networks, *Sensors 2019*, **19(4)**, 1-30.  
 [5] Lee, J. Y., dong Jung, K., Lee, D., (2015). The routing technology of wireless sensor networks using the stochastic cluster head selection method. *International Journal of Control and Automation*, **8(7)**, 385-394.  
 [6] Muhammad, A. (2016). Adaptive energy-efficient clustering path planning routing protocols for heterogeneous wireless sensor networks. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, **12**, 57-71.  
 [7] Krishna, K. H., Babu, Y. S., Kumar, T., (2016). Wireless Network Topological Routing in Wireless Sensor Networks, *Procedia computer science*, **79**, 817-826.  
 [8] Saini, P., Sharma, A. K. (2010). E-DEEC- Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering Scheme for heterogeneous WSN. *in: 2010 1st International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing*, pp. 914-919.  
 [9] Ahmet, G., Zou, J., Fareed, M.M.S., Zeeshan, M., (2015). Sleep- awake energy efficient distributed clustering algorithm for wireless sensor networks. *Computer and Electrical Engineering*, **56**, 385-398.  
 [10] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A. P., Balakrishnan, H., (2000). Energy efficient communication protocol for wireless micro sensor networks. *in: Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-33)*, January 2000.  
 [11] Lindsey, S., Raghavendra, C. S., (2002). PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems. *in: Proceeding of the IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana*, pp. 1-6.  
 [12] Singh, J., Pratap Singh, B., Shaw, S. (2014). A New LEACH-based Routing Protocol for Energy Optimization in Wireless Sensor Network", *2014 5th International Conference on Computer and Communication Technology*, pp. 181-186.  
 [13] Younis, O., Fahmy, S., (2004). HEED: A hybrid, energy efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **3(4)**, 660-669  
 [14] Smaragdakis, G., Matta, I., Bestavros, A., (2004). SEP: A Stable Election Protocol for clustered heterogeneous wireless sensor network. *in: Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA)*, **97(7)**, 1-11.  
 [15] Qing, L., Zhu, Q., Wang, M. (2006). Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor network. *ELSEVIER, Computer Communications*, **29**, 2230- 2237.  
 [16] Elbhiri, B., Saadane, R., El Fkihi, S., Aboutajdine, D. (2010). Developed Distributed Energy-Efficient Clustering (DDEEC) for heterogeneous wireless

sensor networks.in: *5th International Symposium on I/V Communications and Mobile Network (ISVC)*, pp. 1-4.

- [17] Javaid, N., Qureshi, T. N., Khan, A. H., Iqbal, A., Akhtar, E., Ishfaq, M. (2013). EDDEEC: Enhanced Developed Distributed Energy-Efficient Clustering for Heterogeneous Wireless Sensor Networks. *Procedia Computer Science*, **19**, 914-919.
- [18] Vancin, S., Erdem, E., (2017). Performance analysis of the energy efficient clustering models in wireless sensor. 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), Batumi, Georgia. pp. 247-251.
- [19] Gambhir, A., Payal, A., Arya, R. (2018). Performance analysis of artificial bee colony optimization based clustering protocol in various scenarios of WSN. *International Conference on Computational Intelligence and Data Science (ICCIDS 2018)*, **132**, 183-188.



## Çok duvarlı karbon nanotüp katkılı poliamit 6 polimerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi

### Gözde KUŞ

Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler ABD, KÜTAHYA  
gozde\_kus88@hotmail.com ORCID:0000-0003-0964-5967

### Murat KOYUNBAKAN

Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Simav/KÜTAHYA  
murat.koyunbakan@dpu.edu.tr

### Salih Hakan YETGİN\*

Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Simav/KÜTAHYA  
hakan.yetgin@dpu.edu.tr ORCID: 0000-0002-6068-9204 Tel: (274) 5137917 (5092)

### Ferhat YILDIRIM

Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Simav/KÜTAHYA  
ferhat.yildirim@dpu.edu.tr ORCID:0000-0002-0524-4050

### Volkan ESKİZEYBEK

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bil. ve Müh. Böl, ÇANAĞKALE  
veskizeybek@comu.edu.tr ORCID:0000-0002-5373-0379

### Abdurrahman GENÇ

Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler ABD, KÜTAHYA  
abdurrahman.genc@ogr.dpu.edu.tr ORCID:0000-0003-1342-6652

Geliş: 15.01.2020, Revizyon: 11.05.2019, Kabul Tarihi: 05.09.2019

### Öz

Bu çalışmada, poliamit 6 (PA6) polimerine çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) takviye edilerek PA6/ÇDKNT nanokompozitleri üretilmiştir. Elde edilen nanokompozitlerde değişen ÇDKNT miktarının çekme, eğilme ve darbe dayanımlarına etkisi incelenmiştir. ÇDKNT nanotakviyelerinin PA6 matriks içerisindeki homojen dağılımlarının sağlanması için PA6/ÇDKNT karışımı çift vidalı ekstruderden geçirilmiştir. Elde edilen karışım enjeksiyonla kalıplama tekniği kullanılarak, çekme, darbe ve eğilme numunelerinin üretiminde kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, ÇDKNT miktarının PA6 matriksinin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. Buna göre, artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak PA6/ÇDKNT nanokompozitlerin çekme ve eğilme dayanımları ile elastisite modülleri sırasıyla %5.79, %16 ve %7.8 oranlarında artarken darbe dayanımı ve şekil değiştirme değerleri sırasıyla %11.2 ve %988 oranlarında azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Poliamit 6, Çok duvarlı karbon nanotüp, mekanik özellikler

\* Yazışmaların yapılacağı yazar:

## Giriş

Endüstriyel uygulamalarda polimer ve polimer kompozitlerin kullanımı hızla artmaktadır. Endüstriyel ürünlerin tasarımında termoplastikler, hafif olmaları, kimyasallara karşı dayanıklı olmaları, kolay işlenebilmeleri ve geri kazanılabilmeleri gibi özelliklerinden dolayı daha çok tercih edilmeye başlanmıştır. Ancak termoplastiklerin mekanik, termal ve yanmazlık gibi bazı fiziksel özelliklerinin yetersiz oluşu bir dezavantaj oluşturmaktadır. Poliamit (PA) polimeri, geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında yüksek dayanım/ağırlık oranı, korozyon direnci, UV ve gama ışınlarına karşı direnç, oldukça basit ve ekonomik üretim prosesleri nedenleriyle mühendislik plastikleri içerisinde en çok kullanılan yarı-kristalin bir polimer türüdür (Humın vd., 2006; Renê vd., 2016). Ancak, polar amit grupların bulunması sebebiyle yüksek nem alma kapasitesi, düşük ölçü kararlılığı, düşük ısı sapma sıcaklığı, düşük sıcaklıklarda düşük darbe dayanımına sahip olması ve kolay yanabilmesi PA polimerinin kullanım alanlarını sınırlamaktadır (Renê vd., 2016; Jiang, 2008; Yousif ve El-Tayeb, 2008; Kumar ve Kanagaraj, 2016).

Son yıllarda termoplastiklerin fiziksel özelliklerini iyileştirmek için yapıya karbon esaslı ilave edilen nanoparçacıkların ilave edilmesi (karbon nanotüp ve grafen oksit) önemli malzeme geliştirme stratejilerinden biri haline gelmiştir (Patti vd., 2015; Yasser, 2015). Karbon nanotüp (KNT), üstün termal ve elektrik iletkenliği ve mekanik özelliklerinin yanı sıra bir boyutlu (1D) morfolojiye sahip olması nedeniyle polimerlerin takviye edilmesinde sıklıkla tercih edilmektedir (Bhagwan vd., 2012; Zanjanijam, 2014; Kartel vd., 2016; Park, ve Bandaru, 2010). KNT katkı polimer nanokompozitler, polimerizasyon, çözelti karışımı veya ergiyik karıştırma (ekstrüzyon) gibi yöntemler kullanılarak üretilebilmektedir. Bu üretim yöntemleri arasında, özellikle ergiyik karıştırma yöntemi, solventsiz olması, hızlı ve büyütülebilir üretime izin vermesi, düşük maliyetli olması ve çevresel faydaları nedeniyle termoplastik nanokompozitlerin üretiminde

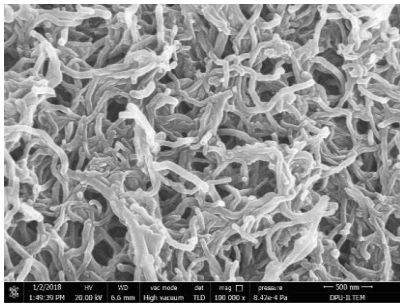
yoğun olarak kullanılmaktadır (Patti vd., 2015). Zou ve arkadaşları (2004) çift vidalı ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemlerini kullanarak ürettikleri çok duvarlı KNT (ÇDKNT) katkı yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kompozitin izod darbe dayanımını inceledikleri çalışmada %1 ÇDKNT ilavesi ile darbe performansının iyileştiğini göstermişlerdir. Benzer bir çalışmada, Kanagari ve arkadaşları (2007) enjeksiyon kalıplama yöntemi ile ürettikleri KNT katkı YYPE nanokompozitinde, artan KNT miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerin arttığını belirtmişlerdir. Bunun sebebi olarak KNT ve YYPE arasındaki ara yüzeyde meydana gelen kimyasal etkileşimler sayesinde yük transferinin iyileşmesine bağlanmıştır. Xiao ve arkadaşları (2007) ise ÇDKNT katkı alçak yoğunluklu polietilen (AYPE) nanokompozitinde, ÇDKNT miktarının % 10 civarında tutulduğunda, elastisite modülünün %89 ve çekme dayanımının %56 oranında arttığını belirtmişlerdir. Ogasawara ve arkadaşları (2004) in-situ polimerizasyon yöntemiyle hazırladıkları poliimit (PI)/ÇDKNT nanokompozitinde, ÇDKNT ilavesi ile elastisite modülünün ve akma dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Liu ve arkadaşları (2007) polieterimit (PEI)/ÇDKNT kompozitinin termal ve mekanik özelliklerini inceledikleri çalışma sonucunda, elastisite modülünün ise %250 oranında arttığını belirtmişlerdir. Manchado ve arkadaşları (2005) ise tek duvarlı karbon nanotüp (TDKNT) katkı izostatik polipropilen (PP) polimerinin termal ve mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, düşük miktarlarda TDKNT katkısının kristal yapıyı değiştirmeden kristallenme oranını artırdığını ve artan TDKNT miktarına bağlı olarak da elastisite modülü ve çekme dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Grady ve arkadaşları da (2002) KNT katkı PP polimerinin kristallenme davranışlarını inceledikleri çalışmada, KNT katının mevcut  $\alpha$ -formuna göre daha az tercih edilen  $\beta$ -formunun oluşumuna katkı sağladığını belirtmişlerdir. KNT katının, PP polimerinin kristallenme oranını artırdığı ve PP polimerinde çekirdekleyici ajan gibi davrandığını belirtmişlerdir. Kearns ve Shambaugh (2002)

%1 oranında TDKNT katkılı PP fiberlerin çekme dayanımının %40, elastisite modülünün ise %55 oranında arttığını belirtmişlerdir. Meincke ve arkadaşları (2004) çift vidalı ekstruder ile ürettikleri KNT katkılı PA6 polimerinin mekanik ve elektriksel özelliklerini inceledikleri çalışmada, düşük katkı oranlarında elektriksel iletkenliğin oluştuğunu ve elastisite modülünün %27 oranında arttığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, farklı oranlarda ÇDKNT katkılı PA6 polimeri ekstrüzyon ve enjeksiyon yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen KNT katkının çekme, eğilme ve darbe performansı gibi mekaniksel özellikler üzerine etkisi incelenmiştir.

## Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplamaya uygun NYLEM® 6 (EMAŞ A.Ş., Bursa/Türkiye) poliamit 6 polimeri kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak ise Detsan A.Ş (Türkiye) firmasından temin edilen çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) kullanılmıştır. ÇDKNT, % 97'den daha yüksek oranda saflığa sahiptir. Seçilen ÇDKNT'lerin ortalama dış çapı 10-20 nm, uzunluğu 10-30 µm ve yüzey alanı >200 m<sup>2</sup>/g'dır. Şekil 1'de, ÇDKNT katkının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1. ÇDKNT katkının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü.

Ekstrüzyon prosesi öncesinde nemi almak için PA6 polimeri ve ÇDKNT, 100 °C'de ve 4 saat boyunca kurutulmuştur. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin üretimi 6 adet ısıtma bölgesi,

22 mm vida çapına sahip ve L/D oranı 32 olan çift vidalı ekstruder kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretim esnasında vida boyunca sıcaklık dağılımı 220-230-235-240-245-245 °C olarak kullanılmıştır. PA6 polimeri içerisine ağırlıkça %0.1, 0.2 ve 0.3 oranlarında ÇDKNT katılarak PA6 nanokompozitler üretilmiştir. Kampaund üretim yöntemi ile granül haline getirilen PA6 polimer nanokompozit granüller Hastec Borche marka enjeksiyon kalıplama makinesi ile kalıplanmıştır. Kalıplama işlemi için kullanılan kalıplar ve kalıplama sonrası elde edilen numuneler Şekil 2'de verilmiştir. Üretimler Gama-Alfa Plastik (Gebze) firmasında gerçekleştirilmiştir. Üretim öncesinde, PA6 polimer nano kompozitlerin nemi alınması için 100 °C ve 4 saat boyunca etüv fırınında bekletilmiştir. Enjeksiyon kalıplama ile üretimlerde Tablo 1'de verilen üretim parametreleri kullanılmıştır.



Şekil 2. Kullanılan kalıplar ve kalıplama sonrası elde edilen numuneler.

Tablo 1. Enjeksiyon kalıplama parametreleri

Parametreler	Giriş	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge	5. Bölge	6. Bölge
Enjeksiyon ısıları	---	250 °C	255 °C	260 °C	265 °C	270 °C	270 °C
Enjeksiyon Basıncı		110 Bar					
Enjeksiyon Hızı		66 mm/dk.					
Ütüleme Basıncı		44 Bar					
Çevrim Süresi		40 Saniye					
Mal AlmaMesafesi		9 mm					
Kalıp		Ç oklu Numune Kalıbı					

Çekme deneyleri, ZWICK/ROELL ICO711001 cihazı kullanılarak, Gama Alfa Plastik San. ve Tic. A.Ş. laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde TS ISO 527 (ASTM D 638)

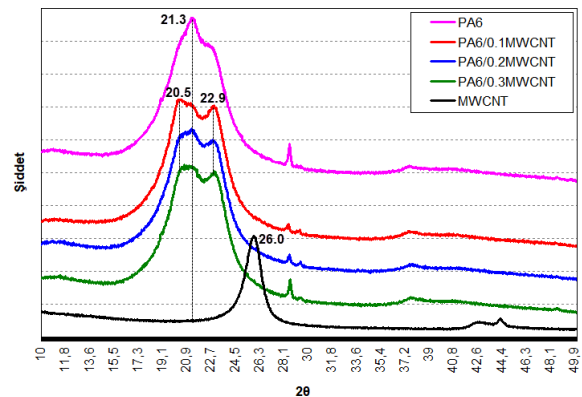
standardına uygun olarak hazırlanmış çekme hızı 5 mm/dak olarak sabitlenmiş ve deneyler oda sıcaklığında ( $23 \pm 2$  °C) yapılmıştır. Çekme deneylerinin sonucunda çekme mukavemeti, şekil değiştirme ve elastisite modülü değerleri ilgili standarda göre hesaplanmıştır. Eğilme testleri Gama Alfa Plastik San. ve Tic. A.Ş. laboratuvarında bulunan ZWICK/ROELL 1C0711002 marka ve modeldeki çekme ve eğme cihazı ile standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Katkısız PA6 polimeri ve ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerine, TS1005 standardına uygun olarak izod darbe deneyleri uygulanmıştır. Darbe testi için ZWICK/ROELL HIT 5-5P marka dijital göstergeli bir darbe deney cihazı kullanılmıştır. İzod darbe deneyleri, enjeksiyon kalıplama ile üretilen 4x10x80 mm ebatlarındaki numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Darbe testinde,  $2,75 \text{ kJ/m}^2$  lik çekiç kullanılmıştır. Tüm mekanik testlerde en az 5'er adet numune ile testler gerçekleştirilmiş ve sonuçların ortalamaları alınmıştır. X-ışını kırınım (XRD) testleri 45 kV ve 40 mA' de çalışabilen Panalytical (Empyrean) Model X ışını difraktometre cihazı ile  $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$  dalga boyuna sahip  $\text{CuK}\alpha$  ışınları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tarama hızı dakikada  $2^\circ$  olacak şekilde  $10^\circ$  ile  $50^\circ$  arasında yapılmıştır.

## Deney sonuçları

### X-ışını kırınım (XRD) testi sonuçları

Şekil 3'de, ÇDKNT, saf PA6 polimeri ile PA6/ÇDKNT nanokompozitlerin XRD grafiği verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi  $2\theta=21.3^\circ$  de kuvvetli pik PA6 polimerinin  $\gamma$ -formu oluşturduğunu göstermektedir. PA6 içerisine ÇDKNT ilavesi ile kristal yapı değişmiş ve  $20.5^\circ$  ve  $22.9^\circ$  piklerinin işaret ettiği üzere PA6'nın  $\alpha$ -formu olduğu belirlenmiştir. ÇDKNT katkısı,  $\alpha$ -formunu daha şiddetli hale getirirken  $\gamma$ -formunun şiddetini azaltmıştır. Ayrıca, karbon nanotüplerin karakteristik pik şiddeti  $2\theta:26.0^\circ$  de elde edilmiştir. Khanna ve Kuhn'a (1997) göre, poliamid 6 polimeri,  $\alpha$ -monoklinik ve  $\gamma$ -pseudoheksagonal olmak üzere iki farklı kristalografik form alabilmektedir.  $\alpha$ -formunda hidrojen bağları anti-paralel zincirler arasında,  $\gamma$ -formunun

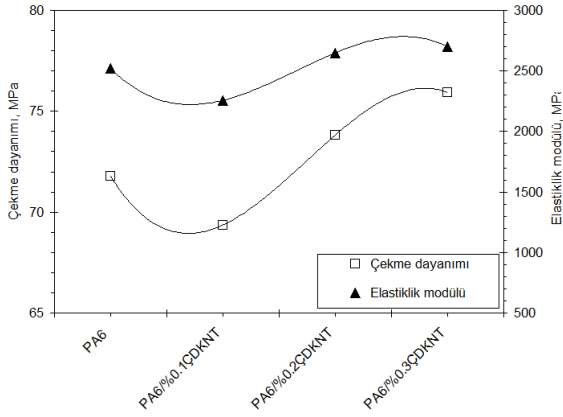
hidrojen bağları ile paralel zincirler arasında olduğu belirtilmiştir. Nasir ve arkadaşları (2014), PA6 polimerinin XRD analizleri sonucunda,  $2\theta:21.28^\circ$  de oluşan kuvvetli pikin  $\gamma$ -formu,  $2\theta:20.48^\circ$  (200) ve  $2\theta:23.24^\circ$  de (002,022) oluşan iki küçük pikin ise  $\alpha$ -formu olduğunu belirtmişlerdir. Katkısız PA6 polimerinde  $\gamma$ -formu ana faz olmak üzere  $\alpha$ -formu ve  $\gamma$ -formundan oluştuğunu belirtmişlerdir.  $\alpha$ -formunun anti-paralel olarak paketlenmiş hidrojen bağlı zincir tabakalarından oluşan termodinamik olarak kararlı bir faz olduğu,  $\gamma$ -formunun ise paralel zincirler arasındaki hidrojen bağlarının sonucu olarak şekillenen daha az kararlı faz olduğunu belirtmişlerdir. PA6 polimerine ilave edilen KNT katkının  $\alpha$ -formunu daha şiddetli hale getirirken  $\gamma$ -formunun şiddetini azalttığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, kompozitlerde baskın fazın  $\alpha$ -fazi olduğu belirtilmiştir (Liu vd., 2004). Hassani ve arkadaşları (2014), katkısız PA6 polimerinin  $2\theta:21.4^\circ$  de baskın faz olan  $\gamma$ -formunu, ve yaklaşık  $2\theta:20^\circ$  ve  $2\theta:23.7^\circ$  de  $\alpha$ -formunu oluşturduklarını belirtmişlerdir., KNT katkının (002) düzleminde yapılarındaki grafitik düzlemleri doğrulayan  $2\theta:26^\circ$  de pik elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan kompozitlerin, (200), (002) ve (220) (Sahoo vd., 2009; Zhang vd., 2009) veya (100), (010) ve (110) (Li vd., 2007) düzlemlerine karşılık gelen  $2\theta:20.5^\circ$  ve  $2\theta:23.9^\circ$  de  $\alpha$ -formunu oluşturduklarını belirtmişlerdir. Bu piklerin, PA6 nanokompozit yapı içerisinde KNT tarafından  $\alpha$  kristal formunun tetiklendiğini göstermektedir.



Şekil 3. ÇDKNT, PA6 polimeri ile PA6 nanokompozitlerin XRD grafiği.



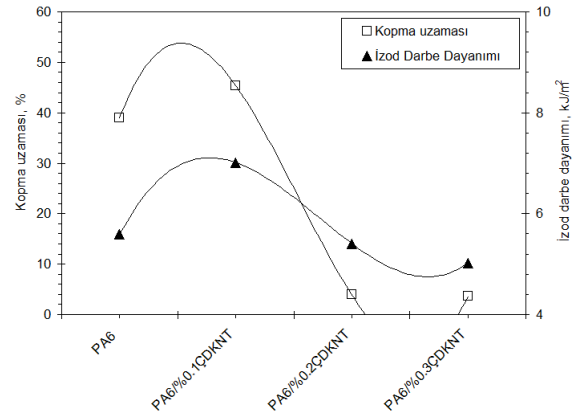
## Çekme ve darbe testi sonuçları



**Şekil 4.** ÇDKNT katkılı PA6 polimer kompozitlerin çekme dayanımı ve elastiklik modülü sonuçları.

KNT katkılı polimer kompozitlerin mekanik özellikleri KNT katkının miktarından, dağılımından, yönlenmesinden ve en/boy oranından önemli oranda etkilenmektedir (Hassani vd., 2014). Şekil 4'de ÇDKNT katkılı PA6 polimer nanokompozitlerin çekme dayanımı ve elastisite modülleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PA6 polimerine ilave edilen % 0.1 oranındaki ÇDKNT çekme dayanımını azaltmıştır. 71.7 MPa olan katkısız PA6 polimerinin çekme dayanımı % 3.46 oranında azalarak 69.3 MPa olarak elde edilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen % 0.2 ve % 0.3 oranındaki ÇDKNT ise çekme dayanımını sırasıyla % 2.86 ve % 5.79 oranlarında artırmıştır. Mekanik özelliklerdeki düşük artış oranı, polimer içerisindeki KNT katkının homojen olmayan dağılımı nedeniyle KNT katkının takviye etkisinin zayıf kalmasına bağlanabilir. KNT katkının yüksek yüzey enerjisi topaklanmaya sebep olmuş olabilir. Dolayısıyla bu topaklanmalar, polimer içerisinde homojen olmayan dağılım ve dolayısıyla gerilim yoğunlaşmasına yol açmaktadır (Zhu vd., 2006). Ayrıca, polimer matris ile KNT katkı arasında herhangi bir kimyasal veya hidrojen bağının oluşmaması mekanik özelliklerdeki artış oranını etkilediği düşünülmektedir. Elastiklik modülü sonuçları incelendiğinde, PA6 polimerine ilave edilen % 0.1 oranındaki ÇDKNT katkı elastiklik

modülünü azaltırken, artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak elastiklik modülünün arttığı belirlenmiştir. Katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında, % 0.3 ÇDKNT katkılı PA6 polimerinin elastiklik modülü % 7.8 oranında artarak 2701MPa değerine ulaşmıştır. Hassani ve arkadaşları da (2014) yaptıkları çalışmada benzer sonuçları elde etmişlerdir. Yapılan çalışmada % 0.1 ve % 0.2 KNT ilavesinde çekme modülünün ortalama % 6 ve % 8 oranlarında arttığını belirtmişlerdir. Çekme dayanımı ve elastisite modülündeki artışın yüksek dayanıma sahip KNTler ile PA6 matris arasında iyileşen yük transferi mekanizmasına bağlanmışlardır (Nasir vd., 2014).



**Şekil 5.** ÇDKNT katkılı PA6 polimer kompozitlerin kopma uzaması ve izod darbe dayanımı sonuçları

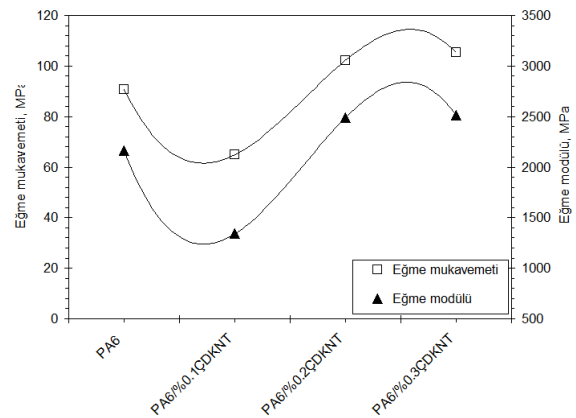
Şekil 5'te ÇDKNT katkılı PA6 polimer kompozitlerin kopma uzaması ve izod darbe dayanımı sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PA6 polimerine ilave edilen % 0.1 oranındaki ÇDKNT kopma uzamasını artırmıştır. % 39.99 olan katkısız PA6 polimerinin kopma uzaması % 7.18 oranında artarak % 45.39 olarak elde edilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen % 0.2 ve % 0.3 oranındaki ÇDKNT ise kopma uzaması değerlerini sırasıyla % 888 ve % 988 oranlarında azaltmıştır. Bu sonuç PA6 kristalleşme sırasında PA6 zincirleri arasında yerleşen KNTlerin zincir hareketliliğini engelleyerek polimeri daha rijit ve dolayısıyla daha gevrek haline getirmesinden kaynaklanmaktadır (Hassani vd., 2014; Vahedi

vd., 2014). Ayrıca, kopma uzamasındaki azalmanın, PA6 matrisi içerisinde, KNT katkıların fiziksel olarak çapraz bağlı noktalar gibi davranarak topaklanması ile çatlak yayılımını başlatan gerilim konsantrasyonu gibi davranmasından kaynaklanabilir (Katti vd., 2014). Benzer bir sonuç Liu ve arkadaşları (2004) tarafından yapılan ÇDKNT katkılı PA6 polimerinde de edilmiştir. Kopma uzamasının, katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında yapının gevrek hale gelmesinden dolayı %27 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Katkısız PA6 polimerinin  $5.5 \text{ kJ/m}^2$  olan darbe dayanımı % 0.1 ÇDKNT ilave edilmesiyle % 25 oranında artarak  $7.01 \text{ kJ/m}^2$  olarak elde edilmiştir. % 0.2 ve % 0.3 ÇDKNT ilavesinde ise katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında, darbe dayanımının %11.2 oranında azaldığı belirlenmiştir. Genel olarak, ÇDKNT katkılı nanokompozitler darbe hasarlarından önemli oranda etkilenmektedir. Kompozitte darbe etkisi sırasında, hasar bölgesi, matrisin çatlaması nedeniyle gerilim yığılmasını lokal olarak büyütme çalışmaktadır. Ancak, darbe etkisiyle oluşan bu hasar kompozit yapı içerisinde bulunan ÇDKNT katkı ile engellenebilmektedir. Bu yüzden, kompozitte bulunan ÇDKNT katkının artan miktarı ile darbe mukavemeti artırılabilir. Bu durum aynı zamanda kompozitlerin kırılma tokluğu ile yakından ilişkilidir. Diğer bir ifade ile ÇDKNT katkı ile polimer arasındaki arayüzey bağı ne kadar kuvvetli ise darbe dayanımı da o kadar yüksek olmaktadır. ÇDKNT katkının % 10-30 arasında olduğu tahmin edilen kırılma şekil değiştirmesi, eğilme ve burkulmaya izin vermektedir ve bu yüksek esneklik ÇDKNT katkılı polimer kompozitler için yüksek darbe dayanımı elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Dimitrios, 2010). Yong ve arkadaşları (2011) % 5 ve % 10 ÇDKNT katkılı PS polimerinin darbe dayanımlarını inceledikleri çalışmada, %5 oranındaki ÇDKNT katkısının darbe dayanımını % 300 oranında artırdığını ancak artan ÇDKNT miktarı ile darbe dayanımının azaldığını belirtmişlerdir. Kaştan ve arkadaşları da (2016) artan nano katkı miktarına bağlı olarak darbe dayanımlarının azaldığını belirtmişlerdir. Bunun sebebinin ise polimer zincirlerinin olumsuz

etkilenmesine, matris içerisinde katkının homojen dağılmamasına, yapısal hatalara ve boşluk oluşumuna bağlamışlardır.

### Eğilme deneyi sonuçları

Şekil 6'da ÇDKNT katkılı PA6 polimer kompozitlerin eğilme dayanımı ve eğilme elastisite modülü sonuçları verilmiştir. Grafikler incelendiğinde elde edilen sonuçların çekme testi ile elde edilen sonuçlar ile benzer oldukları görülmektedir. Katkısız PA6 polimerinin 90.79 MPa olan eğilme dayanımı, % 0.1 ÇDKNT ilavesi ile % 39,9 oranında azalarak 64,88 MPa olarak elde edilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen % 0.2 ve % 0.3 oranlarındaki ÇDKNT katkısı ise eğilme dayanımını artırmıştır. Bu artış, katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında, % 0.2 ÇDKNT için % 12.65 oranında elde edilirken % 0.3 ÇDKNT için % 16 oranında elde edilmiştir. Benzer sonuçlar Ramana (2010) ve Katti (2014) tarafından yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir. Ramana ve arkadaşları (2010) yaptıkları çalışmada %1KNT ilavesi ile eğilme dayanımının yaklaşık %60 oranında artarak 77MPa elde edildiğini belirtmişlerdir. Katti ve arkadaşları (2014) yaptıkları çalışmada da PP polimerinin 45MPa olan eğilme dayanımının %10 oranında ÇDKNT ilavesi ile %36 oranında artarak 61MPa elde edildiğini belirtmişlerdir. Eğilme modülü incelendiğinde ise 1.5GPa olan PP polimerinin değerinin %2.5, 5 ve 10 oranlarında ÇDKNT ilavesi ile %45-50 oranında arttığı belirtilmiştir.



Şekil 6. ÇDKNT katkılı PA6 polimer kompozitlerin eğilme dayanımı ve eğilme modülü sonuçları.

## Deney sonuçları

ÇDKNT katkılı PA6 polimer nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

PA6 polimerine ilave edilen % 0.1 oranındaki ÇDKNT çekme dayanımını azaltırken artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak çekme dayanımı artmıştır.

% 39.99 olan katkısız PA6 polimerinin kopma uzaması % 7.18 oranında artarak % 45.39 olarak elde edilmiştir.

Katkısız PA6 polimerinin 5.5 kJ/m<sup>2</sup> olan darbe dayanımı, % 0.1 ÇDKNT ilave edilmesiyle % 25 oranında artarak 7.01 kJ/m<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.

PA6 polimerine ilave edilen % 0.2 ve % 0.3 oranlarındaki ÇDKNT katkının hem eğme mukavemetini hem de eğmedeki elastiklik modülünü artırdığı belirlenmiştir.

## Teşekkür

Yazarlar, desteklerinden dolayı Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Başkanlığına teşekkür eder (Proje No: 2016-90).

## Kaynaklar

- Bhagwan, F.J., Mayur, S., Madan, K. ve Prakash, K.B., (2012). Dispersion and Performance Properties of Carbon Nanotubes (CNTs) Based Polymer Composites: A Review, *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, **2**, 69-78.
- Dimitrios, B., (2010). Microstructure and Properties of Polypropylene/Carbon Nanotube Nanocomposites, *Materials*, **3**, 2884-2946.
- Grady, B.P., Pompeo, F., Shambaugh, R.L. ve Resasco, D.E., (2002). Nucleation of polypropylene crystallization by single-walled carbon nanotubes, *Journal of Physical Chemistry B*, **106**, 23, 5852-5858.
- Hassani, A.J., Mohd Ishak, Z.A. ve Mohamed, A.R., (2014). Preparation and characterization of polyamide 6 nanocomposites using MWCNTs based on bimetallic Co-Mo/MgO catalyst, *Express Polymer Letters*, **8**, 3, 177-186.
- Humin, L., Xiangmin, X., Xiaohong, L. ve Zhijun, Z., (2006). Morphology, crystallization and dynamic mechanical properties of PA66/nano-

- SiO<sub>2</sub> composites, *Bulletion Materials Science*, **29**, 5, 485-490.
- Jiang, Z., Gyurova, L., Zhang, Z., Friedrich, K. ve Schlarb, A.K., (2008). Neural network based prediction on mechanical and wear properties of short fibers reinforced polyamide composites, *Materials Design*, **29**, 3, 628-637.
- Kanagaraj, S., Varanda, F.R., Zhil'tsova, T.V., Oliveira, M.S.A. ve Simoes, J.A.O., (2007). Mechanical properties of high density polyethylene/carbon nanotube composites, *Composites Science Technology*, **67**, 15-16, 3071-3077.
- Kartel, M., Sementsov, Y., Mahno, S., Trachevskiy, V. ve Bo, W., (2016), Polymer Composites Filled with Multiwall Carbon Nanotubes, *Universal Journal of Materials Science*, **4**, 2, 23-31.
- Kaştan, A., (2016). Polimerik Malzemelerin Darbe Dayanımına Nano Katkıların Etkisi, *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, **4**, 2, 78-84.
- Katti, S.R., Sridhara, B.K. Krishnamurthy, L. ve Shekar, G.L., (2014) Mechanical Behaviour of MWCNT Filled Polypropylene Thermoplastic Composites, *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, **2**, 6-8.
- Kearns, J.C. ve Shambaugh, R.L., (2002). Polypropylene fibers reinforced with carbon nanotubes, *Journal of Applied Polymer Science*, **86**, 2079-2084.
- Khanna, Y.P. ve Khun, W.P., (1997). Measurement of crystalline index in nylons by DSC: Complexities and recommendations. *Journal of Polymer Science*. **35**, 2219-2231.
- Kumar, S.S. ve Kanagaraj, G., (2016). Investigation on Mechanical and Tribological Behaviors of PA6 and Graphite-Reinforced PA6 Polymer Composites, *Arabian Journal of Science Engineering*, **41**, 4347-4357.
- Li, J., Fang, Z., Zhu, Y., Tong, L., Gu, A. ve Liu, F., (2007). Isothermal crystallization kinetics and melting behavior of multiwalled carbon nanotubes/polyamide-6 composites. *Journal of Applied Polymer Science*, **105**, 3531-3542.
- Liu, T., Tong, Y. ve Zhang, W.D., (2007). Preparation and characterization of carbon nanotube/polyetherimide nanocomposite films, *Composites Science Technology*, **67**, 3-4, 406-412.
- Liu, T.X., Phang, I.Y., Shen, L., Chow, S.Y. ve Zhang W.D., (2004). Morphology and

- mechanical properties of multiwalled carbon nanotubes reinforced nylon-6 composites, *Macromolecules*, **37**, 7214-7222.
- Manchado, M.A.L., Valentini, L., Biagiotti, J. ve Kenny, J.M., (2005). Thermal and mechanical properties of single-walled carbon nanotubes-polypropylene composites prepared by melt processing, *Carbon*, **43**, 7, 1499-1505.
- Meincke, O., Kaempfer, D., Weickmann, H., Friedrich, C., Vathauer, M. ve Warth, H., (2004). Mechanical properties and electrical conductivity of carbon-nanotube filled polyamide-6 and its blends with acrylonitrile/butadiene/styrene, *Polymer*, **45**, 3, 739-748.
- Nasir, M., Mohammad, I., Asad, H., Shaukat, S. ve Ahmad Nawaz, K., (2014). Polyamide-6-based composites reinforced with pristine or functionalized multi-walled carbon nanotubes produced using melt extrusion technique, *Journal of Composite Materials*, **48**, 10, 1197-1207.
- Ogasawara, T., Ishida, Y., Ishikawa, T. ve Yokota, R. (2004). Characterization of multi-walled carbon nanotube/phenylethynyl terminated polyimide composites, *Composite Part A: Applied Science Manufacturing*, **35**, 1, 67-74.
- Park, S.H. ve Bandaru, P.R., (2010). Improved mechanical properties of carbon nanotube/polymer composites through the use of carboxyl-epoxide functional group linkages, *Polymer*, **51**, 5071-5077
- Patti, A., Barretta, R., Marotti de Sciarra, F., Mensitieri, G., Menna, C. ve Russo, P., (2015). Flexural properties of multi-wall carbon nanotube/polypropylene composites: Experimental investigation and nonlocal modeling, *Composite Structures*, **131**, 282-289.
- Ramana, G.V., Balaji, P., Kumar, P.N, Parabhabar, K.V.P. ve Jain, P.K., (2010). Mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced polymer nanocomposites, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, **17**, 331-337.
- Renê Anisio da, P., Amanda Melissa Damião, L., Edcleide Maria, A., Vanessa da Nóbrega, M., Tomás Jeferson Alves de, M. ve Luiz Antônio, P., (2016). Mechanical and thermomechanical properties of polyamide 6/Brazilian organoclay nanocomposites, *Polímeros*, **26**, 1, 52-60,
- Sahoo, N.G., Cheng, H.K.F., Cai, J., Li, L., Chan, S.H., Zhao, J. ve Yu, S., (2009). Improvement of mechanical and thermal properties of carbon nanotube composites through nanotube functionalization and processing methods. *Materials Chemistry and Physics*, **117**, 313-320 .
- Vahedi, F., Shahverdi, H.R., Shokrieh, M.M. ve Esmkhani, M., (2014). Effects of carbon nanotube content on the mechanical and electrical properties of epoxy-based composites, *New Carbon Materials*, **29**, 6, 419-425.
- Xiao, K.Q., Zhang, L.C. ve Zarudi, I., (2007). Mechanical and rheological properties of carbon nanotube-reinforced polyethylene composites, *Composites Science Technology*, **67**, 2, 177-182.
- Yasser, Z., (2015). Effects of interphase on tensile strength of polymer/CNT nanocomposites by Kelly-Tyson theory, *Mechanics of Materials*, **85**, 1-6.
- Yong, L., Kai, M. N., Chi-Ming, C., Guoxing, S. ve Jingshen, W., (2011). High-impact polystyrene/halloysite nanocomposites prepared by emulsion polymerization using sodium dodecyl sulfate as surfactant, *Journal of Colloid and Interface Science*, **358**, 2, 423-429.
- Yousif, B.F. ve El-Tayeb, N.S.M., (2008). Wear and friction characteristics of CGRP composite under wet contact condition using two different test techniques, *Wear*, **265**, 5-6, 856-864.
- Zanjanijam, A.R., Hajian, M., Koohmareh, G.A.J., (2014). *Macromol. Sci. Part A*, **51**, 369.
- Zhang, F., Zhou, L., Xiong, Y., Liu, G. ve Xu, W., (2009). Isothermal crystallization kinetics of high-flow nylon 6 by differential scanning calorimetry. *Journal of Applied Polymer Science*, **111**, 2930-2937.
- Zhu, B.K., Xie, S.H., Xu, Z.K., Xu, Y.Y., (2006). Preparation and properties of the polyimide/multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) nanocomposites, *Composites Science and Technology*, **66**, 548-554.
- Zou, Y., Feng, Y., Wang, L. ve Liu, X., (2004). Processing and properties of MWNT/HDPE composites, *Carbon*, **42**, 2, 271-277.

## Investigation of the mechanical properties of multi walled carbon nanotube filled polyamide 6 polymers

### Extended abstract

*Polymers and composites with lower density and higher strength/weight ratio than steel and aluminum have become one of the most important material groups for the automotive sector.*

*A variety of 15 polymer types are used in a car, but most preferred are polypropylene (PP), polyurethane (PU), polyvinylchloride (PVC), polyethylene (PE), acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) and nylon (PA). Approximately 75% of the polymer and composite applications in automobiles are used in the interior trims, 14% in the outer part and 11% in the electric parts and under hood components. When the passenger section of any car is examined, it can be seen that the polymers are used extensively. Polymers are used in heating, ventilation and air conditioning control systems, control panels, lighting, bumper systems, fuel storage and supply systems, mirror and door components, fenders, engine compartment or other parts under the hood.*

*It is a known fact that the weight will decrease with increasing the ratio of polymer and composite used in the car. Fillers such as talc, mica, and calcium carbonate provide a high modulus of elasticity while increasing the weight and melt viscosity of the polymer. At the same time, these fillers reduce toughness and surface quality. Glass fibers provide high stiffness while increasing ductility and cost. These conventional fillers are significantly increase the weight because of used at high levels,.*

*In recent years, the use of nano-reinforced polymer nano composites is increasing. This is due to do fact that although nano materials are used much less amount (wt. 0.1-5%) than traditional fillers (wt. 10-50%), they provide similar or even superior mechanical and chemical material properties. The important properties of polymer nano composites compared to other composites are that they can be easily shaped with different manufacturing processes on different sectors and have low density because of using lower amounts of filler material.*

*Graphene and carbon nanotubes are the most common nano-scale additives. The most important*

*characteristics are that they have a very large surface area compared to their weights, they have strong interface with matrix materials and they have very high physical and mechanical properties.*

*In this study, multi-walled carbon nanotube (MWCNT) was added to polyamide 6 (PA6) polymers to obtain PA6/MWCNT nano composites and the effects of varying amount of MWCNT on the tensile, bending and impact mechanical properties of composite were investigated. The twin screw extruder is used to ensure homogeneous distribution of the MWCNT nanoparticles in the PA6 matrix. The tensile, bending and impact test specimens were obtained by using plastic injection molding manufacturing method. According to the result of the study, it was detected that the amount of MWCNT had a significant effect on the mechanical properties of PA6 matrix. Depending on the amount of increasing MWCNT, the tensile and flexural strengths and the modulus of elasticity of PA6/MWCNT nano composites increased by 5.79%, 16% and 7.8% respectively, while the impact strength and deformation values decreased by 11.2% and 988%, respectively.*

**Keywords:** Polyamide 6, Multi walled carbon nanotube, Mechanical properties



## WC-Ni sert dolgu alaşımının kuru ve NaCl çözelti ortamlarındaki aşınma performansı

**Nilay ÇÖMEZ**

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Manisa, Türkiye.

e-mail: [nilay.comez@cbu.edu.tr](mailto:nilay.comez@cbu.edu.tr), ORCID: 0000-0002-6432-6582

Geliş: 19.02.2019, Revizyon: 25.03.2019, Kabul Tarihi: 29.04.2019

### Öz

Nikel esaslı matris malzemesi içerisinde homojene yakın bir şekilde dağılmış tungsten karbür (WC) parçacıkları ile üretilen sert dolgu kaplamaları, sertlik, aşınma direnci ve korozyonun mükemmel kombinasyonunu sunmaktadır. Bu çalışmada plazma ark kaynağı ile nikel esaslı matris malzemesine küresel WC partikülleri ilave edilerek sert dolgu kaplama üretimi gerçekleştirilmiştir ve aşınma ortamının aşınma miktarına etkisi araştırılmıştır. Kaplamanın genel sertliği makro Vickers (HV10) metodu ile ölçülmüştür. Ayrıca, WC partiküllerinin ve matris/karbür ötektığının sertliği HV3 metodu ile belirlenmiştir. Kaplamanın “ball-on-disc” aşınma testleri hem kuru ortamda hem de ağırlıkça %5 NaCl sulu çözeltisi içerisinde, 10 N yük altında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Karşı eleman olarak 6 mm çapında alümina bilye kullanılmıştır. Kayma hızı ve mesafesi sırasıyla 3 cm/s ve 2000 m olarak ayarlanmıştır. Her 500 metrede bir profilometre ile aşınma izinin topoğrafyası çıkarılmıştır ve hacimsel malzeme kaybı hesaplanmıştır. Artan kayma mesafesi ile malzeme kaybı artmıştır. Çözelti ortamındaki aşınma testinde gerçekleşen hacimsel malzeme kaybının kuru ortama göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çözeltide yapılan aşınma testinde, sadece aşınmanın mekanik etkisi ile değil aynı zamanda korozyon sebebiyle de malzeme kaybı meydana geldiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Tungsten karbür, nikel, sert dolgu, aşınma, sertlik

## Giriş

Bir bileşenin amaçlanan işlevini yerine getirmemesi durumu arıza olarak tanımlanmaktadır. Mühendislik bileşenlerinin arızası, başlıca dört başlık altında incelenmektedir: kırılma, korozyon, aşınma ve deformasyon. Aşınma, toplam arızaların %55'ini oluşturmaktadır. Aşınma, malzeme yüzeyine temas eden bir katı, sıvı veya gazın mekanik etkisiyle meydana gelen malzeme kaybı ve yüzey hasarı olarak tanımlanmaktadır (Pawar vd., 2019).

Yüksek sertlikte karbürleri barındıran tok metalik matrise sahip kaplamalar, aşınmanın sebep olduğu kayıpların üstesinden gelmek için korumalı metal ark kaynağı, gazaltı kaynağı, TIG kaynağı, özlü telle ark kaynağı, plazma transfer ark kaynağı ve lazer kaynağı gibi çeşitli sert dolgu teknikleri ile üretilmektedir (Van Acker vd., 2005; Buchely vd., 2005; Chaidemenopoulos vd., 2019).

Sert dolgu kaplamaların en yaygın uygulamaları arasında maden endüstrisinde kullanılan ekskavatörlerin kenarları, sondaj ekipmanları, maden kırıcıları ve toprak hazırlama ekipmanları yer almaktadır (Chaidemenopoulos vd., 2019). Bu kaplamalar aşınmanın yanı sıra üstün korozyon direnci de sağlayabilmektedir (Buchely vd., 2005).

Tungsten karbür (WC) parçacıkları yüksek sertlik ve aşınma direnci özellikleri sebebiyle sert dolgu alaşımlarında sıkça takviye elemanı olarak tercih edilmektedir (St-Georges, 2007; Zhou vd., 2012; Hajihashemi vd., 2015). WC parçacıklarının nikel gibi sünek bir matris malzemesi içerisinde bulunması, aşınma direncine ilave olarak oldukça iyi darbe ve yorulma direnci sağlamaktadır (Van Acker vd., 2005; Buchely vd., 2005; Leech vd., 2012). Balakrishnan vd., 2013, WC içerikli sert dolgu kaplamayı 4 mm kalınlığında orta katman olarak uygulayıp tüm kaplamanın balistik performansına etkisini incelemiştir. Leech vd., 2012, WC-Ni kaplamanın aşınma direncini hem kuru kum-kauçuk tekerlek abrazyon

testiyle hem de pin-on-flat aşınma testiyle tespit etmişlerdir. Van Acker vd., 2005, ise lazer yöntemiyle üretilmiş WC-Ni kaplamalara ball-crater aşınma testi uygulamışlardır. Literatürde uygulanan aşınma testleri kuru ortamda gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, plazma ark kaynağı ile üretilen WC-Ni kaplamanın kuru ortamda ve %5 NaCl içerisindeki aşınma davranışı incelenmiştir. Bu sayede çözeltinin aşınma kaybına etkisini ortaya çıkarmak amaçlanmıştır.

## Materyal ve Yöntem

### WC-Ni kaplamasının üretimi

Hacimsel olarak yaklaşık %60 küresel WC parçacığı ve %40 NiCr13.5B2.8Si4C0.55Fe3.9 kompozisyonuna sahip nikel esaslı ticari alaşımı içeren toz karışımı plazma ark kaynağı ile 5 mm kalınlığındaki düşük karbonlu çelik altlık üzerine kaplanmıştır (Tablo 1). Ni-esaslı alaşımlı toz, kaplamanın matris fazı olarak kullanılmıştır. WC-Ni toz karışımı kaynak esnasında arkın olduğu bölgeye sevk edilerek 3 mm kalınlığında bir kaplama elde edilmiştir.

**Tablo 1.** Nikel esaslı matris malzemesinin ve çelik altlığın kimyasal kompozisyonu

Element	Cr	B	Si	C	Fe	Ni
Matris	13.5	2.8	4	0.55	3.9	75.25
Element	C	Mn	Fe		Diğer	
Çelik	0.05	0.22	99.68		0.045	

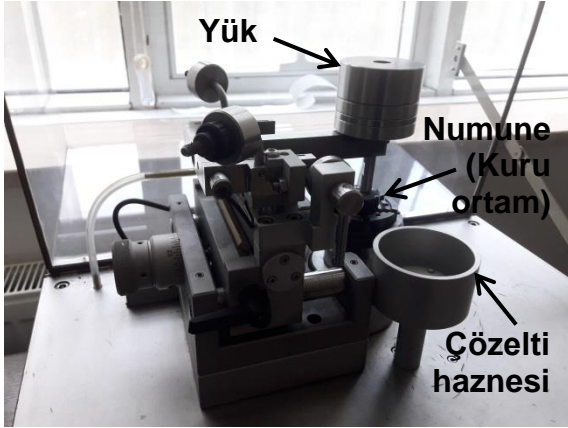
### Mikroyapı incelemeleri ve sertlik testi

Zımparalama-parlatma işlemine tabi tutulan kaplama optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu altında incelenmiştir. Makro sertlik testleri Vickers uç kullanılarak 10 kg yük altında 10 saniye boyunca gerçekleştirilmiştir. Ayrıca WC parçacıklarının ve matris/karbür ötekliğinin sertliği HV3 metodu ile ölçülmüştür.

### Aşınma testi

WC-Ni sert dolgu kaplamasının aşınma performansı CSM Instruments Tribometer aşınma test cihazında ball-on-disc metodu ile belirlenmiştir (Şekil 1). Aşınma testleri hem kuru ortamda hem de %5 NaCl içerisinde gerçekleştirilmiştir. Karşı eleman olarak 6 mm

çapında alümina bilye kullanılmıştır. Aşınma testleri 10 N yük altında 3 cm/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Toplam kayma mesafesi 2000 m olarak ayarlanmıştır ve her 500 metrede bir profilometre ile aşınma izinin profili çıkarılmıştır. Bu sayede hacimsel aşınma kaybı hesaplanmıştır.



Şekil 1. Aşınma test cihazı

## Sonuçlar ve Tartışma

### Mikroyapı incelemeleri

Mikroyapı incelemeleri, WC parçacıklarının nikel esaslı matris içerisinde homojene yakın bir dağılım sergilediğini ve karbür parçacıklarının matris malzemesi tarafından ıslatılabilirliğinin uygun olduğunu göstermektedir (Şekil 2a). WC parçacıklarının boyutu Şekil 2b'de görüldüğü gibi ölçülmüştür ve ortalama parçacık boyutu 74.39 µm olarak hesaplanmıştır.

Şekil 2c'de kaplamada çatlakların meydana geldiği görülmektedir. Çatlaklar WC parçacıkları boyunca ilerleyerek bu karbürleri iki parçaya ayırmaktadır. Çatlak oluşumu, kaplamanın katılaşması esnasında kırılğan karbür fazları sebebiyle meydana gelebilmektedir (Buchanan vd., 2008). Kaplamadaki çatlaklar, çalışma sırasında çatlak yayılımı açısından bir kusur olarak algılanabilir. Bununla birlikte, oluşan çatlaklar katılaşma esnasında meydana gelen gerilmeleri hafifleterek ve dökülmeleri önleyerek faydalı olabilirler (Buchanan vd., 2007).

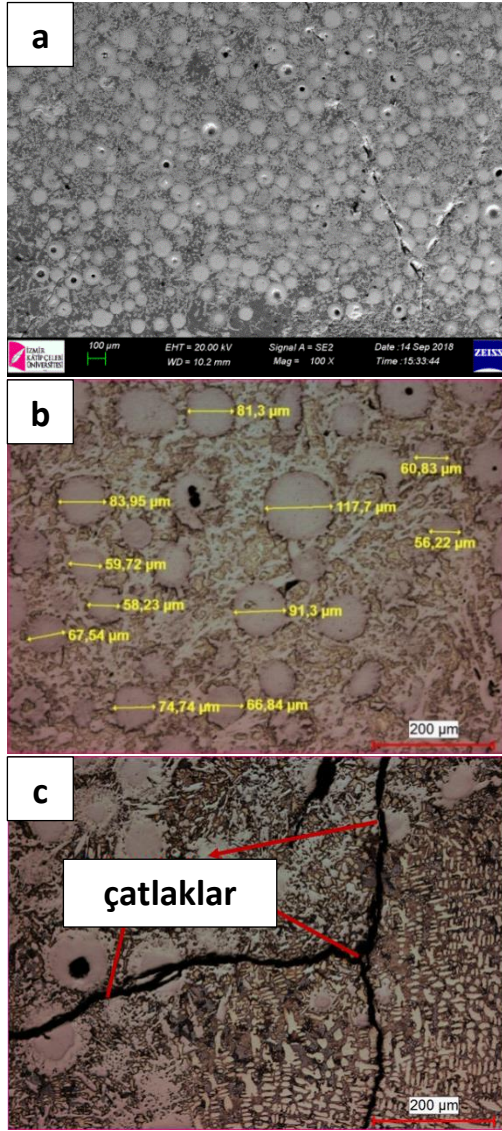
Şekil 3a'da kaplama/çelik altlık ara yüzeyi görülmektedir. Kaplama malzemesinin altlık malzemesinin tanelerinden epitaksiyel olarak büyüdüğü tespit edilmiştir. Epitaksiyel büyümede, kaplama malzemesinin atomları çelik altlık malzemesine eklenir ve bu nedenle bu taneleri kaplama malzemesine doğru büyütür (Karimzadeh vd., 2006). Kaplamanın altlık malzemesine yakın bölgesinde dendritik mikroyapı ve dendrit kolları arasında çökelen ikincil karbürler dikkat çekmektedir. Buytoz vd., 2013, AISI 316 paslanmaz çelik altlık üzerine B<sub>4</sub>C tozuyla takviye edilen Fe-C-Cr sert dolgu alaşımını plazma transferli ark kaynağı ile kaplamışlardır. Kaplamanın üretim esnasında altlık malzemesi tarafından seyreltilmesi sebebiyle kompozisyon ve mikroyapısal değişimlerin meydana geldiğini bildirmişlerdir. Bu çalışmada da benzer şekilde altlık malzemesinden uzaklaştıkça sekonder karbür morfolojisinin değişime uğradığı tespit edilmiştir. Kaplama ve altlık malzemesi ara yüzeyinde nüfuziyet eksikliği ya da gözenek oluşumu tespit edilmemiştir.

Şekil 3b'de kaplamada meydana gelen seyrelme alan olarak ifade edilmiştir. Seyrelme oranı, %Seyrelme=(Y/(X+Y))\*100 ifadesi ile kolayca hesaplanabilmektedir (Tahaei vd., 2016). Şekil 3'te ölçülen alanlara göre seyrelme oranı %19.25 olarak hesaplanmıştır.

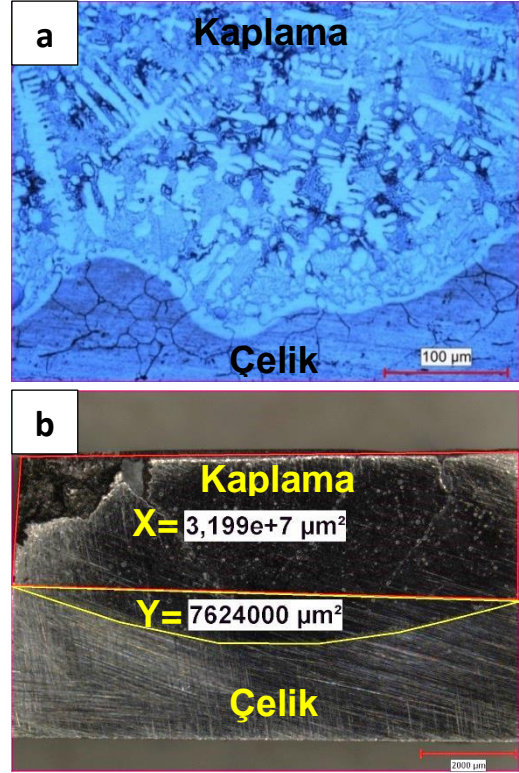
WC parçacığı boyunca alınan SEM-EDX çizgi analizi Şekil 4'te verilmiştir. Tungsten elementince zengin açık renkli dairesel alanda demir ve nikel eser miktarda bulunurken, bu dairenin dışına doğru özellikle nikel miktarında artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Kaplama esnasında, WC parçacığının dış yüzeyinde çözünme meydana gelmektedir. Çözünen tungsten karbür ve nikel esaslı matris arasındaki reaksiyon Ni<sub>2</sub>W<sub>4</sub>C ve/veya NiW gibi intermetalik bileşiklerin oluşumuna sebep olmaktadır (Leech vd., 2012; Deng vd., 2015). SEM-EDX çizgi analizinde tespit edilen WC parçacığının çözünmeyen açık renkli kısmının etrafındaki fazların Ni<sub>2</sub>W<sub>4</sub>C ve/veya NiW fazları olduğu XRD analiziyle doğrulanmıştır (Şekil 5). Bu fazlar haricinde, kaplamada NiW<sub>4</sub>,



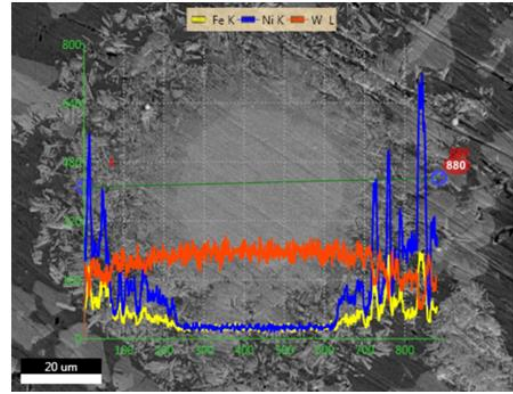
W<sub>2</sub>C ve CrB gibi fazların da oluştuğu tespit edilmiştir.



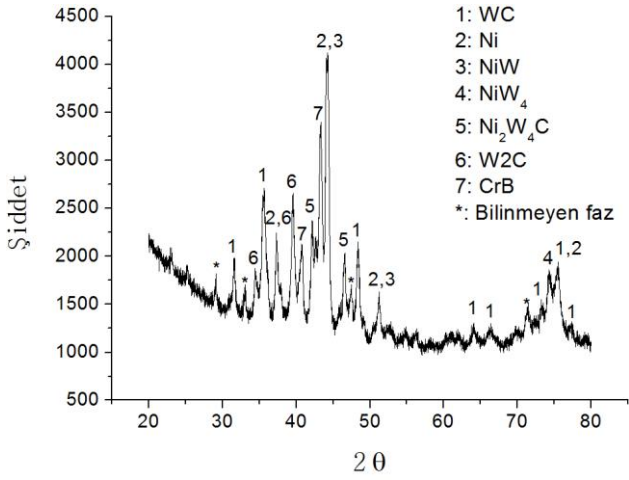
Şekil 2. a) WC-Ni sert dolgu kaplaması, b) WC parçacıklarının boyutu, c) Çatlak oluşumu



Şekil 3. a) WC-Ni kaplamasında meydana gelen epitaksiyel büyüme, b) kaplamada meydana gelen seyrelme



Şekil 4. WC parçacığı boyunca SEM-EDX çizgi analizi



Şekil 5. WC-Ni kaplamasına ait XRD grafiği

### Sertlik ve aşınma testleri

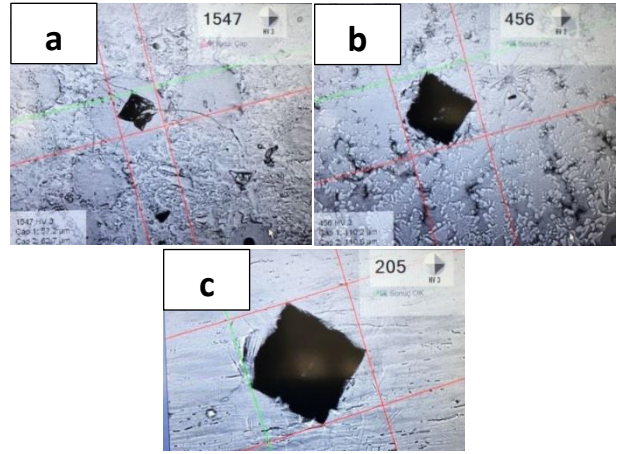
WC-Ni sert dolgu kaplamasının sertlik değerleri Tablo 2’de verilmektedir. Kaplamanın genel sertlik ölçümünün yanı sıra Şekil 6’da görüldüğü gibi WC parçacıklarının ve matris/karbür ötektiğinin de sertlik değerleri HV3 metodu ile tespit edilmiştir (Şekil 6a ve 6b). Çelik altlık malzemesinin sertliği 205 HV3 olarak bulunmuştur (Şekil 6c).

**Tablo 2.** WC-Ni sert dolgu kaplamasının sertlik değerleri

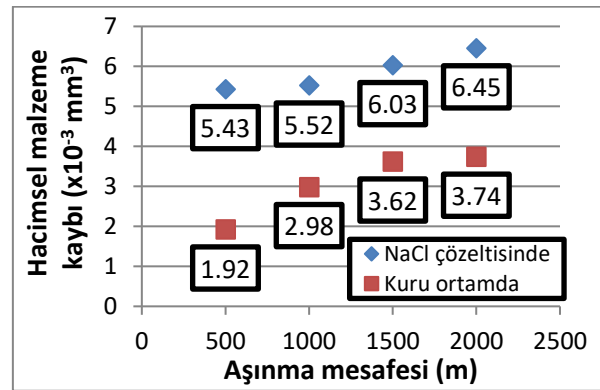
Ölçüm	Genel sertlik (HV <sub>10</sub> )	Karbür/Matris Ötektiği (HV <sub>3</sub> )	WC (HV <sub>3</sub> )
1	1211	456	1547
2	1086	513	1640
3	1218	498	1866
Ort.	1171.7	489	1684.3

Liyanage vd., 2012, üç farklı Ni esaslı alaşım kullanarak WC-Ni kaplamaları üretmişlerdir ve 601-852 HV aralığında kaplama sertlik değerleri elde etmişlerdir. Bu çalışmada, WC-Ni kaplamasında 1171.67 HV genel ortalama sertlik değerine ulaşılmıştır. Kaplamanın genel ortalama sertlik değerinin, çelik altlık malzemesinden yaklaşık 5 kat daha fazla olduğu görülmüştür. En yüksek ortalama sertlik değeri 1684.3 HV ile WC parçacıklarında elde edilmiştir. Parçacıkların yüksek sertliği kırılabilirliği da beraberinde getirmiştir. Şekil 6a’da görüldüğü gibi sertlik ölçümü sırasında

WC parçacığından başlayan çatlak bir diğer WC parçacığına ve karbür/matris ötektiğine kadar yayılmıştır.



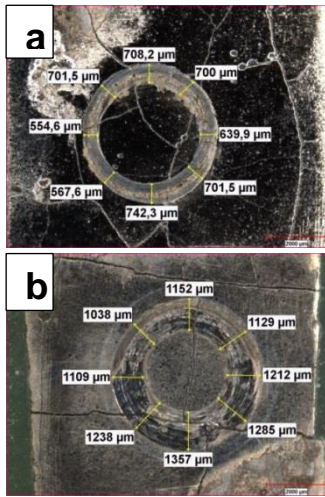
Şekil 6. Sertlik izleri: a) WC, b) Karbür/matris ötektiği, c) Çelik



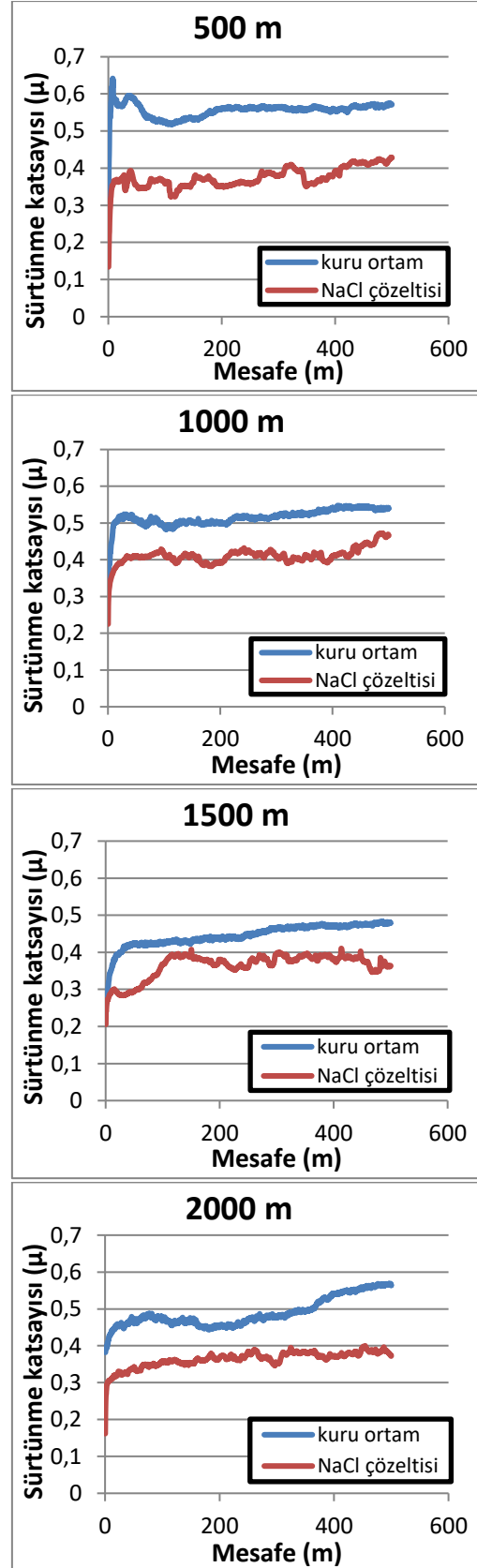
Şekil 7. Aşınma testi sonucunda meydana gelen hacimsel malzeme kaybı

Kuru ortamda ve %5 NaCl içerisinde gerçekleştirilen aşınma testi sonucunda meydana gelen hacimsel malzeme kaybı mesafeye bağlı olarak Şekil 7’de verilmiştir. Her iki durumda da malzeme kaybının artan aşınma mesafesiyle arttığı görülmüştür. Kuru ortamda gerçekleştirilen aşınmada ölçüm alınan iki mesafe arasındaki malzeme kaybının farkı azalma eğilimi sergilemiştir. Örneğin, 500 m ve 1000 m arasındaki malzeme kaybı farkı  $1.06 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  iken 1000 m ve 1500 m arasında bu fark  $0.64 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  olarak hesaplanmıştır. Son olarak bu değer 1500 m ve 2000 m arasında  $0.12 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ’e kadar gerilemiştir. Bu durum

oluşmasında iki sebep akla gelmektedir. Birincisi, matris fazının aşınmasıyla açığa çıkan sert WC parçacıkları karşı eleman olan alümina bilyayı aşındırabilir. Bunun sonucunda alümina bilyanın oluşturduğu aşınma ürünleri aşınma izini doldurarak malzeme kaybındaki farkın giderek azalmasına sebep olabilir. İkincisi ise kaplamanın matris malzemesinde pekleşme meydana gelmesi ve pekleşme sebebiyle artan sertliğin aşınma sürecini yavaşlatması şeklinde açıklanabilir. %5 NaCl içerisinde gerçekleşen aşınma testinde ise ölçüm alınan iki mesafe arasındaki malzeme kaybının farkı artma eğilimi sergilemiştir. 500 m ve 1000 m arasındaki malzeme kaybı farkı  $0.09 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  iken 1000 m-1500m ve 1500m-2000m arasındaki fark sırasıyla  $0.51 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  ve  $0.42 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  olarak hesaplanmıştır. Sıvı aşınma ortamında aşınma ürünlerinin kolayca aşınma izinden uzaklaşabilmesi ve çözeltinin korozif etkisi sebebiyle aşınmanın daha şiddetli gerçekleşmesi bu farkın artmasına sebep olan etmenler olarak göz önüne alınmıştır. Ortalama aşınma izi genişliği, aşınma testi %5 NaCl içerisinde gerçekleştirilen numunede daha fazla ölçülmüştür. Aşınma izinin ortalama genişliği kuru ortamda  $664.45 \mu\text{m}$  iken çözeltide yapılan aşınmada  $1190 \mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Aşınma izlerinin makro görüntüleri: a) Kuru ortam, b) Çözelti ortamı

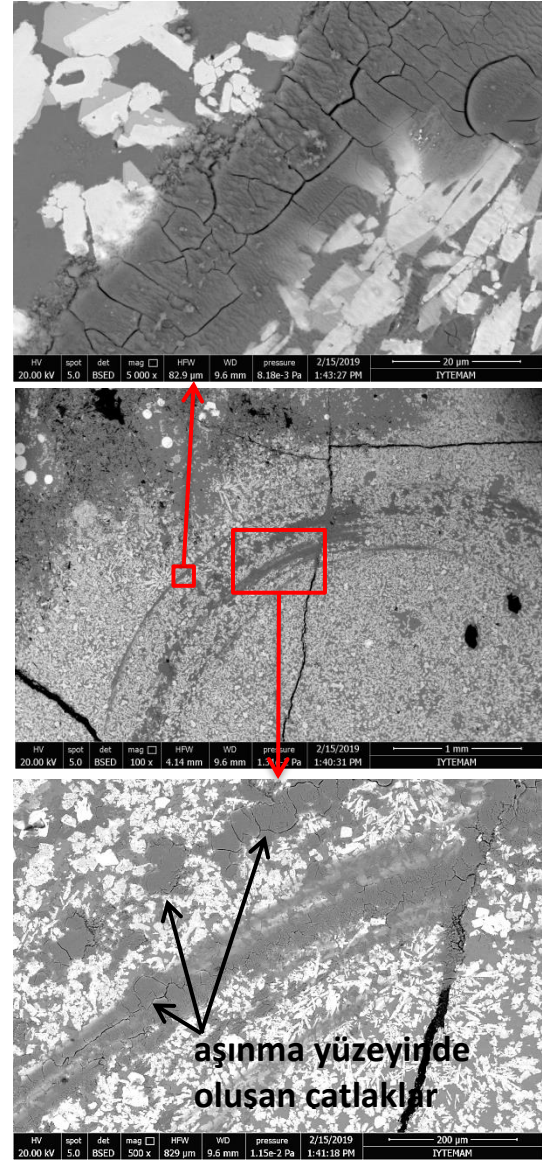


Şekil 9. Sürtünme katsayısı grafikleri  
Mesafeye bağlı sürünme katsayısı grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Kuru ortam aşınma

testinde sürtünme katsayısının daha yüksek olduğu görülmüştür. Aşınma testinin %5 NaCl içerisinde gerçekleştirilmesi durumunda hem sıvı ortamın hem de NaCl sebebiyle aşınma yüzeyinde oluşabilecek oksitli aşınma ürünlerinin etkisiyle sürtünme katsayısı kuru ortamda aşınmaya göre daha düşüktür. Han vd., 2016, NaCl konsantrasyonunun SAF 2507 duplex (çift fazlı) paslanmaz çeliğinin aşınma-korozyon davranışına etkisini incelemiştir. Artan NaCl konsantrasyonu ile sürtünme katsayısının azaldığını bildirmişlerdir. Çözelti yüzeydeki oksit tabakasının oluşumunu hızlandırarak sürtünme katsayısını azaltmaktadır (Han vd., 2016).

Kuru ortamda gerçekleşen aşınma testi sonrasında yapılan SEM incelemelerinde, matris malzemesinin plastik deformasyonu sonucu çatladığı ve aşınma izinin kenarına yığıldığı görülmüştür (Şekil 10). Malzeme kaybının, oluşan çatlakların pul pul dökülmesi sebebiyle meydana geldiği düşünülmektedir. Şekil 11’de ve Tablo 3’te kimyasal analizi verilen açık renkli W-Ni-C-Cr bileşiklerinin ise aşınmaya karşı WC partikülleri gibi direnç sergilediği tespit edilmiştir.

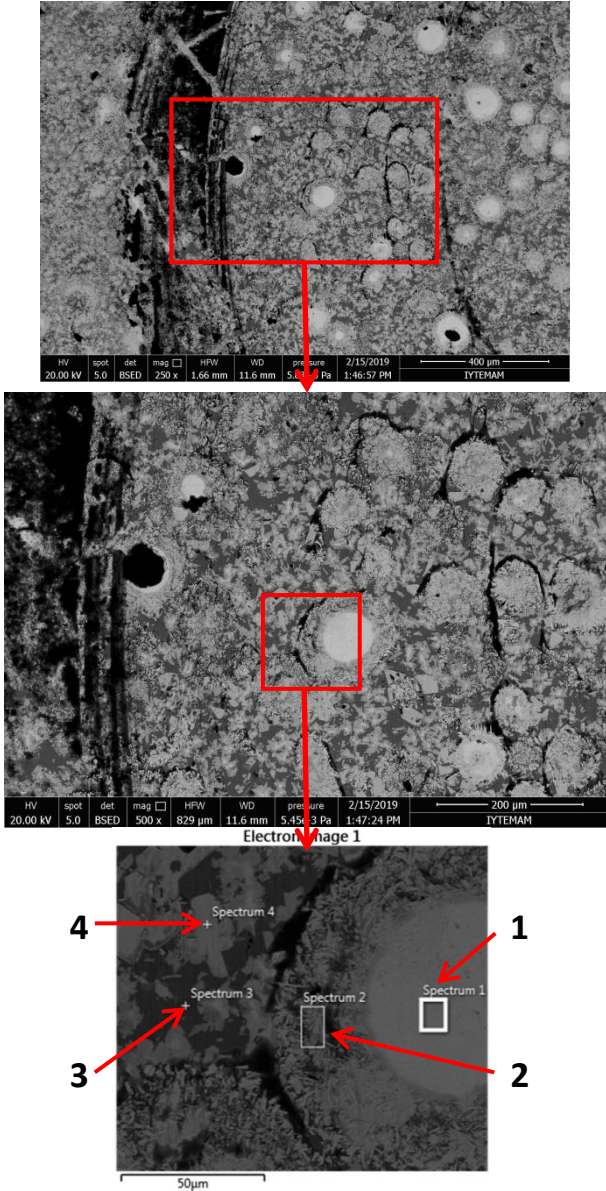
Şekil 11’de çözeltide gerçekleştirilen aşınma testi sonrasında aşınma izinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Kuru ortamda gerçekleşen aşınma testi ile kıyaslandığında, hem aşınma izinde hem de WC parçacıklarının etrafında korozyon sebebiyle malzeme kaybı meydana geldiği görülmüştür. Dolayısıyla %5 NaCl ortamındaki aşınmada malzeme kaybı sadece mekanik etki ile değil aynı zamanda korozyon etkisi ile meydana gelmiştir. 2 ile numaralandırılan EDX analizinde oksijen bulgusuna rastlanmıştır (Şekil 11 ve Tablo 3). Bu durum korozyon sonucu oksitli bileşiklerin oluşumuna işaret etmektedir. Bu nedenle çözeltide gerçekleştirilen aşınmada kuru ortama göre hacimsel malzeme kaybı daha yüksektir (Şekil 7).



Şekil 10. Kuru ortamda aşınma testi sonrası aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

Tablo 3. Şekil 11’de verilen EDX analizinin sonuçları

Element	1	2	3	4
W	90.87	61.84	1.56	80.00
C	6.35	5.68	5.89	2.93
Ni	-	16.94	77.55	12.43
Fe	-	2.99	10.67	1.72
Na	0.12	-	-	-
O	2.66	9.60	-	-
Cr	-	2.95	4.33	2.92
Toplam	100.00	100.00	100.00	100.00



Şekil 11. NaCl çözeltisi içerisinde aşınma testi sonrası aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

## Sonuçlar

WC takviyeli nikel esaslı sert dolgu alaşımı plazma ark kaynağı ile başarılı bir şekilde düşük karbonlu çelik altlık yüzeyine kaplanmıştır. Çalışmada elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

1. WC parçacıkları özellikle kaplamanın üst yüzeyinde birikmiştir ve bu bölgede homojene yakın bir dağılım sergilemiştir. WC parçacıklarının nikel matris tarafından iyi ölçüde ıslatılabildiği görülmüştür. Kaplama ve altlık malzemesi arasında epitaksiyel büyümeyi içeren bir

metalurjik bağ gerçekleşmiştir ve ara yüzeyde nüfuziyet eksikliği ya da gözenek oluşumu tespit edilmemiştir.

2. WC/Ni sert dolgu kaplamanın ortalama makro sertliği 1171.67 HV olarak tespit edilmiştir. WC parçacıklarının ve karbür/matris ötektiğinin ortalama sertlik değerleri ise sırasıyla 1684.3 ve 489 HV'dir. Kaplama, çelik altlık malzemesine kıyasla 5.7 kat daha serttir.
3. Hem kuru ortam hem de %5 NaCl içerisinde yapılan aşınma testinde, malzeme kaybı artan kayma mesafesi ile birlikte artmıştır. çözeltide gerçekleştirilen aşınma sonucunda kuru ortama kıyasla daha fazla malzeme kaybı meydana gelmiştir. Malzeme kaybındaki artışta korozyonun etkili olduğu görülmüştür.
4. Sürtünme katsayısı kuru ortamda gerçekleşen aşınmada daha yüksek iken çözeltinin yüzeyde oluşturduğu oksit tabakası nedeniyle %5 NaCl içerisinde gerçekleştirilen aşınmada daha düşüktür.

## Kaynaklar

- Balakrishnan, M., Balasubramanian, V., Reddy, G.M., (2013). Effect of hardfacing consumables on ballistic performance of Q&T steel joints, *Defence Technology*, 9(4), 249-258.
- Buchanan, V.E., McCartney, D.G., Shipway, P.H., (2008). A comparison of the abrasive wear behaviour of iron-chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying, *Wear*, 264(7-8), 542-549.
- Buchanan, V.E., Shipway, P.H., McCartney, D.G., (2007). Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry, *Wear*, 263(1-6), 99-110.
- Buchely, M.F., Gutierrez, J.C., Leon, L.M., Toro, A., (2005). The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys, *Wear*, 259(1-6), 52-61.
- Buytoz, S., Orhan, A., Gur, A. K., Caligulu, U. (2013). Microstructural Development of Fe-Cr-C and B<sub>4</sub>C Powder Alloy Coating on Stainless Steel by Plasma-Transferred Arc Weld Surfacing. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(8), 2197-2204.

- Chaidemenopoulos, N.G., Psyllaki, P.P., Pavlidou, E., Vourlias, G., (2019). Aspects on carbides transformations of Fe-based hardfacing deposits, *Surface and Coatings Technology*, 357, 651-661.
- Deng, D., Zhang, L., Niu, T., Liu, H., Zhang, H., (2015). Microstructures and wear performance of PTAW deposited Ni-based coatings with spherical tungsten carbide, *Metals*, 5(4), 1984-1996.
- Hajihashemi, M., Shamanian, M., Azimi, G., (2015). Physical, Mechanical, and Dry Sliding Wear Properties of Fe-Cr-WC Hardfacing Alloys Under Different Tungsten Addition, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 46(2), 919-927.
- Han, G., Jiang, P., Wang, J., Yan, F., (2016). Effects of NaCl concentration on wear-corrosion behavior of SAF 2507 super duplex stainless steel, *RSC Advances*, 6(112), 111261-111268.
- Karimzadeh, F., Ebnonnasir, A., Foroughi, A., (2006). Artificial neural network modeling for evaluating of epitaxial growth of Ti6Al4V weldment, *Materials Science and Engineering: A*, 432(1-2), 184-190.
- Leech, P.W., Li, X.S., Alam, N., (2012). Comparison of abrasive wear of a complex high alloy hardfacing deposit and WC-Ni based metal matrix composite, *Wear*, 294, 380-386.
- Liyanage, T., Fisher, G., Gerlich, A.P., (2012). Microstructures and abrasive wear performance of PTAW deposited Ni-WC overlays using different Ni-alloy chemistries, *Wear*, 274, 345-354.
- Pawar, S., Jha, A.K., Mukhopadhyay, G., (2019). Effect of different carbides on the wear resistance of Fe-based hardfacing alloys, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 78, 288-295.
- St-Georges, L., (2007). Development and characterization of composite Ni-Cr+ WC laser cladding, *Wear*, 263(1-6), 562-566.
- Tahaei, A., Vazquez, F. G., Merlin, M., ArizmendiMorquecho, A., Valdes, F. A. R., & Garagnani, G. L. (2016). Metallurgical Characterization of a Weld Bead Coating Applied by the PTA Process on the D2 Tool Steel. *Soldagem & Inspeção*, 21(2), 209-219.
- Van Acker, K., Vanhoyweghen, D., Persoons, R., angrunderbeek, J., (2005). Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings, *Wear*, 258(1-4), 194-202.
- Zhou, Y.F., Yang, Y.L., Li, D., Yang, J., Jiang, Y.W., Ren, X.J., Yang, Q.X., (2012). Effect of titanium content on microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C hardfacing layers, *Welding Journal*, 91(8), 229-235.

## **Wear performance of WC-Ni hardfacing coating in dry medium and NaCl solution**

### **Extended abstract**

*Wear and corrosion are common problems almost in all industrial fields. Hardfacing coatings are strongly recommended as a solution for the combination of wear and corrosion due to the ease of application and a wide variety of hardfacing alloys. The hardfacing coatings produced by tungsten carbide (WC) particles embedded in a nickel matrix provide an excellent combination of hardness, wear, and corrosion resistance.*

*In this study, the hardfacing coating was produced by plasma arc welding using nickel-based matrix material and spherical WC particles. In literature, the studies about the wear performance of WC-Ni hardfacing coatings in different media are insufficient. However, the effect of corrosive agents on wear resistance should be enlightened. For this purpose, this study investigated the effect of wear test media on the material loss.*

*Microstructural examinations were carried out by an optical microscope and scanning electron microscope. The coating consists of a nickel-based matrix, WC particles and secondary carbide/matrix eutectic around these particles. The metallurgical bond between the steel substrate and the WC-Ni coating was found to be adequate due to the formation of epitaxial growth. No pore was observed at the coating/substrate interface. The average WC particle size was calculated as 74.39  $\mu\text{m}$ .*

*The overall hardness of coating was determined by macro Vickers (HV10) hardness test. In addition, hardness values of WC particles, secondary carbide/nickel matrix eutectic, and steel substrate were measured by HV3 method. All hardness values were calculated as the mean of three measurements. The overall hardness of WC-Ni hardfacing coating was determined as 1171.67 HV10. The average hardness values of WC particle and the eutectic of secondary carbide and matrix were obtained as 1684.3 and 489 HV3, respectively. The hardness of the coating was found to be 5.7 times harder than the steel substrate.*

*The coating was subjected to “ball-on-disc” wear test in dry sliding condition and in 5 wt.% NaCl aqueous solution media under 10 N load at room temperature. Alumina ball in a diameter of 6 mm was employed as the counterpart. Sliding speed was set to 3 cm/s along the sliding distance of 2000 m. Volumetric material loss was calculated by obtaining the profile of the wear track for every 500 m. Material loss tended to increase with increasing sliding distance. The volumetric material loss was found to be higher for the wear test carried out in NaCl solution than that of the wear test in dry sliding condition. NaCl solution induced the corrosion and increased the material loss by the material dissolution in addition to the mechanical effect of the wear mechanism. Oxygen was detected by SEM-EDX analysis after the wear test in NaCl media. That indicates the formation of corrosion products such as iron oxide or chromium oxide.*

**Keywords:** Tungsten carbide, nickel, hardfacing, wear, hardness



## Çift elips yapısı etrafında çözüm uyarlamalı Navier-Stokes çözücüsü kullanarak yüksek Reynolds sayılı akış analizi

**Emre Kara\***

Gaziantep Üniversitesi, Uçak ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Gaziantep  
[emrekara@gantep.edu.tr](mailto:emrekara@gantep.edu.tr) ORCID: 0000-0002-9282-5805, Tel: (342) 360 12 00 (3517)

**Ahmet İhsan Kutlar**

Gaziantep Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gaziantep  
[aikutlar@gantep.edu.tr](mailto:aikutlar@gantep.edu.tr) ORCID: 0000-0002-8564-0458, Tel: (342) 360 12 00 (2543)

**Mehmet Halûk Aksel**

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara  
[aksel@metu.edu.tr](mailto:aksel@metu.edu.tr) ORCID: 0000-0003-0563-4216, Tel: (312) 210 52 98

Geliş: 06.03.2019, Revizyon: 03.05.2019, Kabul Tarihi: 28.05.2019

### Öz

*Bu çalışmada, çift elips yapısı etrafında yüksek Reynolds ve Mach (hipersonik) sayılarında ve 30 derece hücum açısındaki akışın Kartezyen temelli akış çözümü kullanılarak analizi yapılmıştır. Analiz için, yerel olarak geliştirilmiş, hiyerarşik (köken, çocuk ve komşu hücrelerin bağıl olarak tanımlandığı) Kartezyen ağ tekniklerini kullanan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) temelli akış çözücüsü kullanılmıştır. Öncelikle ağ geliştirme kodlarında kullanılan Kartezyen ağ yöntemleri ile ilgili bilgi verilmiş, ikinci adımda akış çözücüsündeki sayısal yöntemlerin denklemler eşliğinde açıklamaları yapılmış, son olarak, seçilen örnek çalışma etrafındaki akışın sayısal analizi yapılmıştır. Doğrulama çalışması için, çift (basit) elips yapısı etrafında 16.7 milyon Reynolds sayısı ile 8.15 Mach sayısında ve 30 derece hücum açısındaki akış seçilmiştir. Bu çalışmanın seçilmesinin başlıca nedeni bu akış altında hem yay (bow) şokunu hem de yüzey (canopy) şokunu aynı anda yakalayabilmeyi sağlamaktır. Liou'nun yukarı iletimli ayrıştırma yöntemiyle eliptik yapının etrafındaki basınç sabitleri dağılımı elde edilmiştir. Türbülanslı ve sıkıştırılabilir akış için iki-boyutlu çift elips yapısı üzerinde hassas çözümleri geliştirilmiştir. Çok katmanlı yöntem ile akış çözücüsünün yakınsama oranı artırılmıştır. Sonuçlar, yakın zamanda yazılmış bilimsel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Hem yay burun şoku hem de keskin yüzey şoku başarılı ve deneysel sonuçlarla tutarlı şekilde akış çözücüsü tarafından yakalanmıştır. Yüzey çevresindeki Mach sayısı kontürleri başarılı şekilde benzetilmiş, referans çalışmalardaki değerler arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Son bölümde sonuçlarla ilgili tartışma yapılmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında öngörülerde bulunulmuştur.*

**Anahtar Kelimeler:** Kartezyen ağ; çift elips yapısı; çözüm uyarlama; çok katmanlı yöntem; yüksek Reynolds sayılı akış.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar



## Giriş

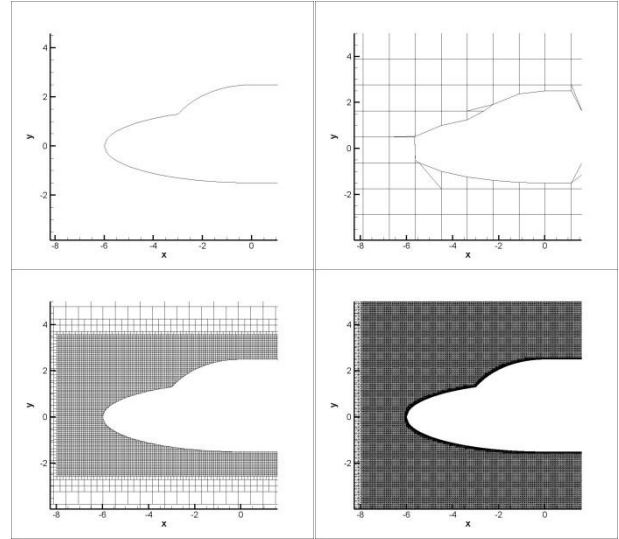
Mevcut çalışmada akış çözümü için, yerel olarak geliştirilmiş, hiyerarşik (köken, çocuk ve komşu hücrelerin bağıl olarak tanımlandığı) Kartezyen ağ tekniklerini kullanan HAD temelli akış çözücüsü kullanılmıştır. İki boyutlu, düzensiz geometrilerin etrafındaki sıkıştırılabilir gazların yüksek hızda akış dinamiğinin çözümüne boyutsuz hale getirilen Navier-Stokes denklemleri ile ulaşılmıştır. Sürtünmesiz (inviscid), sürtünlü (viscous) ve türbülanslı akışların çözümündeki yetkinliği artırmak için sonlu hacim ayrıklaştırma ile açık (explicit) zamanlı adımlama yöntemi, yerel zaman adımlama ve çok katmanlı yöntemlerden (Hartmann vd., 2008) yararlanılmıştır.

Çalışmanın gelişimi şu şekilde olacaktır: Birinci bölümde ağ geliştirme kodlarında kullanılan Kartezyen ağ yöntemleri ile ilgili bilgi verilecek, ikinci bölümde akış çözücüsündeki sayısal yöntemlerin denklemler eşliğinde açıklamaları yapılacak, üçüncü bölümde seçilen örnek çalışma (çift elips yapısı) etrafındaki akışın sayısal analizi yapılacaktır. Son bölümde, sonuçlarla ilgili tartışma yapılacak ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında öngörülerde bulunulacaktır.

## Materyal ve Yöntem

### Kartezyen Ağ Yöntemleri

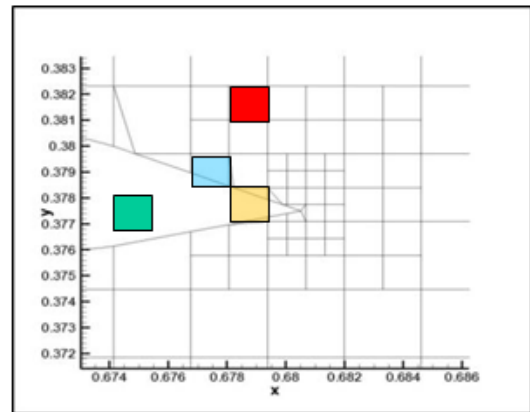
Kartezyen yöntemleri, yapısız ağ yöntemlerinin özel bir alt dalıdır. Son on yılda, özellikle karmaşık geometriler etrafında yapılan çözümlerde, uyarlamalı Kartezyen ağ üretimi algoritmalarının güçlü bir şekilde canlandığı görülmektedir (Bungartz vd., 2010; Berger vd., 2012; Chung, 2013). Çok elemanlı (multi-element) ve/veya düzensiz gövdelerin çevresinde oluşturulabilen Kartezyen ağlar (Şekil 1) Navier-Stokes denklemleri gibi kısmi türevli denklemlerin çözümünde faydalı etkiler elde edilmesini sağlamaktadır. Geleneksel yapısız ağ yöntemlerinin kullanmadığı ayrıcalıklı tekniklerden (çok katmanlı yöntemler gibi) de yararlanması ayrı bir artıdır.



Şekil 1. Çift elips yapısı etrafında üç aşamalı Kartezyen ağ gösterimi

### Hücre Hiyerarşisi

Kartezyen ağ üretimi sırasında katı yüzeyle kesişen hücre dikkatli bir şekilde saptanıp işaretlenmelidir. Aslında tüm çözüm hücrelerinin katı yüzeyle kesişip kesişmeme olasılıkları tek tek kontrol edilmelidir. Çözüm hücresi, katı yüzeyin içinde kalıyorsa “iç-hücre”, dışında kalıyorsa “dış-hücre” olarak tanımlanır. Eğer bir kere kesişiyorlarsa, “kesik-hücre” olarak tanımlanmalı, fakat kesişme sonrası birden fazla parçası dışarıda kalıyorsa “bölünmüş-hücre” olarak tanımlanmalıdır. Şekil 2’de tüm bu hücre tipleri sırasıyla yeşil, kırmızı, mavi ve sarı renklerle gösterilmiştir. Kullanılan algoritma, “sınırlayan kareler (marching squares) yöntemi” (Çakmak, 2009) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2. Hücre tiplerinin tanımlanması

### Çok katmanlı ağ yöntemi

Problemin boyutsal ve zamansal ayrıklaştırılması sonrası, çözüme varımda en büyük sorun yakınsamadır. Burada devreye giren çok katmanlı ağ yönteminin görevi, seyrek ağ elemanlarını sık ağ elemanlarından daha fazla kullanmaktır (Jameson, 1985). Bunu yaparken “Full Approximation Storage (FAS)” çok katmanlı yöntemi (De Zeeuw, 1993) lineer olmayan viskoz akış benzetimi için kullanılmıştır.

Uygulamaya, sık ağ elemanlarının hem artan (kalıntı-residual) vektörünün hem de çözüm vektörünün bir seviye yüksek olan seyrek ağ elemanına aktarımı ile başlanır. Ağlar arası (inter-grid) transfer operatörü olarak tanımlanan bu işlemin adımları;

- (i) sık ağ iterasyonu (fine grid iteration),
- (ii) daraltma (restriction),
- (iii) uzatma (prolongation),
- (iv) düzeltme (correction) adımlarıdır.

$L(Q)$  doğrusal olmayan denklemler sistemiyle başlamak üzere:

$$L(Q) = FF \quad (1)$$

Denklem 1’de  $L$  doğrusal olmayan operatörü,  $FF$  zorlama fonksiyonu ve  $Q$  çözüm vektörünü tanımlamaktadır.

#### Sık ağ iterasyonu (Fine grid iteration) adımı

Bu adımın sonucunda, çözüm alanında ağ aralığı  $h$  olan sık ağ elemanının yüksek frekanslı olan hatalarını azaltmak için yeni bir çözüme yuvarlanması istenmektedir. Bu  $h$  seviyesinde, artan şu şekilde kurulmuştur:

$$Res^h = FF^h - L^h Q^h \quad (2)$$

#### Daraltma (Restriction) adımı

Birkaç Runge-Kutta döngüsünden sonra, seyrek ağ elemanı daraltılmış çözüm vektörü,  $Q^{2h}$ , aşağıdaki daraltma denklemi ile transfer edilir:

$$Q^{2h} = I_h^{2h} Q^h \quad (3)$$

Yukarıdaki denklemde,  $h$  sık ağ elemanına,  $2h$  seyrek ağ elemanına,  $I$  saktan seyreğe daraltma operatörüne tekabül etmektedir.

#### Uzatma (Prolongation) adımı

Seyrek ağ zorlama fonksiyonu,  $FF^{2h}$ , akış denklemlerine eklenir:

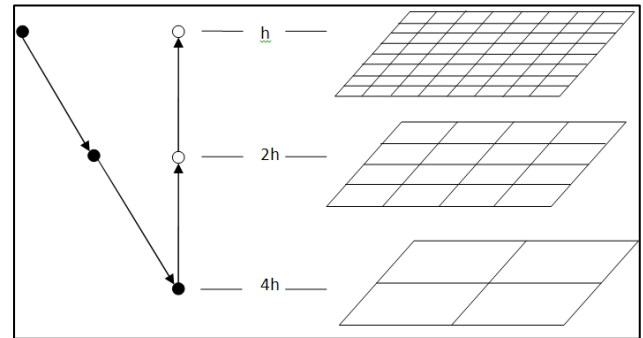
$$FF^{2h} = I_h^{2h} Res^h(Q^h) - Res^{2h}(Q^{2h}) \quad (4)$$

#### Düzeltilme (Correction) ve Son Ağ İterasyonu Adımı

İlk iterasyon (güncelleme) sonrası, seyrek ağ artanı terimleri sık ağ artanı terimlerine dönüştürülür. Sık ağ çözümleri, seyrek ağda  $m$  tane zaman adımlaması yürütülmesi süresince çoklu doğrusal interpolasyon yöntemi ile aşağıdaki denklemle düzeltilir:

$$Q_{cor}^h = Q^h + I_h^{2h}(Q_m^{2h} - Q_0^{2h}) \quad (5)$$

Önceden tanımlanmış seyrek ağ elemanına varıldığı zaman, sık ağ elemanına ulaşılan kadar uzatma adımı peş peşe tekrar edilir. Bu çalışmada, anlatılan işlemler  $V$  (testere dişi) döngüsü ile ele alınmıştır (Çakmak, 2009). Şekil 3’te içi dolu daireler, ●, daraltma öncesi zaman adımlarını; içi boş daireler, ○, uzatma sonrası zaman adımlarını göstermektedir. Seviyesi  $h$  ile gösterilen en sık ağ elemanı, önce  $2h$  ve  $4h$  ağ seviyelerine genişletilmiş, sonra da özgün boyutlarına uzatılmıştır.



Şekil 3. Üç ağ seviyesindeki ( $h$ ,  $2h$ ,  $4h$ ) çok katmanlı ağ döngüsünün gösterimi

### Sayısal yöntemler

Bu bölümde, Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin Spalart-Allmaras türbülans

modeli ile kapatıldığı (tamamlandığı), kısaca RANS-SA denilen denklemlerin iki boyutlu sıkıştırılabilir akışkanların viskoz (ağdalı) akışlardaki integral formu gösterilecektir. Özgün ve Eyi'nin de (2014) belirttiği gibi, Spalart-Allmaras (SA) türbülans modeli diğer modellere göre hem daha az zaman (CPU) harcamakta, hem de yüzey basıncı ile akış ayrılması tahminlerinde genelde daha isabetli tahminler vermektedir. SA modeli (Kara, 2017), bir işleyen (working) değişkeni, sonrasında da eddy viskozitesini çözebilir. Bu iki değişken eklemesiyle birlikte, RANS denklemlerine SA'nın kısmi türevli denklemleri eklenerek denklemler tamamlanmıştır. RANS-SA denklemlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için, aşağıdaki Gauss ıraksama teoremi kullanılarak (Blazek, 2015) integral formu oluşturulmuştur:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_A \mathbf{Q} dA + \int_S (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) dS = \int_S (\mathbf{G} \cdot \mathbf{n}) dS + \int_A S dA \quad (6)$$

Yukarıdaki denklemde,  $A$  hücre alanını,  $S$  hücre kenarlarını,  $\mathbf{Q}$  korunan değişkenin vektörünü,  $S$  türbülans kaynak terimini göstermektedir.  $(\mathbf{F} \cdot \mathbf{n})$  sürtünmesiz (konvektif) akı vektörü olan  $\mathbf{F}$ 'nin, toplam akının hesaplandığı hücrenin yüzeyine dik olan bileşenidir.  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{n})$  viskoz (difüzyif) akı vektörü olan  $\mathbf{G}$ 'nin, toplam akının hesaplandığı hücrenin yüzeyine dik olan bileşenidir.  $\mathbf{Q}$ , herhangi bir korunan değişkenin; yoğunluk,  $\rho$ , x- ve y-hız bileşenleri olan sırasıyla  $u$  ve  $v$ , toplam enerji,  $E$  veya SA işleyen değişkeni,  $\tilde{v}$  vektörünü temsil edebilir:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \\ \rho \tilde{v} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Kaynak terimlerini ( $S_t$ ) içeren kaynak vektörü,  $\mathbf{S}$ , aşağıda verilmiştir:

$$\mathbf{S} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad S_t]^T \quad (8)$$

SA model denklemini içeren, sürtünmesiz (inviscid) akı vektörleri,  $\mathbf{F}$ , aşağıda gösterilmiştir:

$$\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} \quad (9)$$

$$F_x = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uH \\ \rho u\tilde{v} \end{bmatrix}; F_y = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v^2 + p \\ \rho vH \\ \rho v\tilde{v} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Yukarıdaki denklemlerde,  $H$  toplam entalpiyi,  $p$  ise akışkanın statik basıncını göstermektedir.  $E$ ,  $H$  ve  $p$  değişkenlerini birbirine bağlayan denklemler aşağıda verilmiştir:

$$E = e + \frac{u^2 + v^2}{2} \quad (11)$$

$$H = E + \frac{p}{\rho} \quad (12)$$

Yukarıdaki iki denklem,  $\gamma$  ile birleştirilirse aşağıdaki genel denkleme varılır:

$$p = (\gamma - 1) \left( \rho E - \frac{\rho(u^2 + v^2)}{2} \right) \quad (13)$$

Viskoz akı vektörü,  $\mathbf{G}$ , aşağıda verilmiştir:

$$\mathbf{G} = G_x \mathbf{i} + G_y \mathbf{j} \quad (14)$$

$$G_x = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{yx} \\ u \tau_{xx} + v \tau_{xy} - q_x \\ \frac{1}{\sigma} \rho (v + \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ u \tau_{yx} + v \tau_{yy} - q_y \\ \frac{1}{\sigma} \rho (v + \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Sürtünmeli (viscous) gerilme elemanları,  $\tau_{ij}$ , şu şekilde tanımlanır:

$$\tau_{xx} = \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2 \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (17)$$

$$\tau_{yy} = \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2 \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \quad (18)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = 2 \mu_{eff} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (19)$$

$$\lambda = -\frac{2}{3} \mu_{eff} \quad (20)$$

Yukarıdaki denklemlerde efektif viskozite,  $\mu_{eff}$ , eddy (türbülans) viskozitesi,  $\mu_t$  ile moleküler viskozite,  $\mu$ , toplamından oluşur.  $\lambda$  ile gösterilen yığın (bulk) viskozitenin, Stokes'un bağıntısı (Blazek, 2015) olarak da bilinen tanımı denklem 20'de verilmiştir. Difüzyon akı,  $q_i$ , Fourier'in ısı iletimi yasası ile şu şekilde gösterilebilir:

$$q_x = C \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \quad (21)$$

$$q_y = C \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \quad (22)$$

Denklemlerde  $C$ , sabit basınç altında özgül ısıyı,  $T$  akışkanın sıcaklığını,  $Pr$ , Prandtl sayısını,  $Pr_t$ , türbülans Prandtl sayısını göstermektedir. Mükemmel gaz varsayımı halinde, moleküler viskozite,  $\mu$ , aşağıdaki Sutherland yasası (Blazek, 2015) vasıtasıyla sadece akışkan sıcaklığının ( $T$ , Kelvin derecesinde) fonksiyonu haline getirilmiştir:

$$\frac{\mu}{\mu_\infty} = \frac{T_\infty + C_{suth}}{T + C_{suth}} \left( \frac{T}{T_\infty} \right)^{3/2} \quad (23)$$

Yukarıdaki denklemde  $\mu_\infty$ , referans sıcaklık  $T_\infty$ 'daki referans dinamik viskoziteyi,  $C_{suth}$  Sutherland sabiti olarak bilinen efektif sıcaklığı tanımlamaktadır. Bu çalışmada, hava için  $C_{suth}$  110.4 K ve  $T_\infty$  ise 273.15 K olarak alınmıştır.

Yukarıdaki denklemlerden denklem 6'dan denklem 16'ya kadar olan kısım kullanılarak, türbülans viskozitesi,  $\mu_t$ , her matriste el altındaki satırda görünen türbülans transport denklemi içindeki işleyen değişken,  $\tilde{v}$ , vasıtasıyla modellenilebilir/hesaplanabilir. Bir süreklilik denklemi, üç momentum denklemi, bir enerji denklemi üzerine bu türbülans transport denklemleri eklenerek denklemler sisteminin sayısı altıya çıkarılmıştır. Böylelikle bilinmeyen

değişkenler olan  $\rho$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$  ve türbülans viskozitesi  $\mu_t$  (altı değişken) çözülebilir.

Şokları yakalamak için yapılan çözüm uyarlaması aşağıdaki parametrelere ve minimum/maksimum kriterlerine (Marshall, 2003) göre yapılmıştır. Kontrol hacminin karakteristik uzunlukları olan,  $\zeta$ , konservatif değişkenlerin bir hücreden komşu hücreye geçişinde aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\zeta_{D,x} = |\nabla \bullet u| V^{0.5};$$

$$\zeta_{D,y} = |\nabla \bullet v| V^{0.5}; \quad \zeta_{D,z} = |\nabla \bullet w| V^{0.5} \quad (24.a)$$

$$\zeta_{C,x} = |\nabla \bullet u| V^{0.5};$$

$$\zeta_{C,y} = |\nabla \bullet v| V^{0.5}; \quad \zeta_{C,z} = |\nabla \bullet w| V^{0.5} \quad (24.b)$$

Denklem 24'teki alt indisler,  $D$  ve  $C$ , sırasıyla hız vektörlerinin ıraksama (divergence) ve kıvrılma (curl) tanımlarını göstermektedir. Referans değerleriyle bu üç karakteristik uzunluğun standart sapması tüm çözüm alanı için aşağıdaki denklemle bulunmaktadır:

$$\sigma_D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \zeta_{D,x}^2 + \zeta_{D,y}^2 + \zeta_{D,z}^2 \quad (25.a)$$

$$\sigma_C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \zeta_{C,x}^2 + \zeta_{C,y}^2 + \zeta_{C,z}^2 \quad (25.b)$$

Denklem 25'te  $N$  çözüm alanı hücrelerinin toplam sayısını ifade etmektedir. Her hücre sıkılaştırma veya genişletme uygulaması için çözüm sırasında  $t_r$  ve  $t_c$  eşik değerlerine göre işaretlenmekte ve bu işlemler aşağıda verilen kriterlere göre uygulanmaktadır:

$$(\zeta_{D,x} + \zeta_{D,y} + \zeta_{D,z} > t_r \sigma_D)$$

ve

$$(\zeta_{C,x} + \zeta_{C,y} + \zeta_{C,z} > t_r \sigma_C)$$

$$\text{geçerliyse sıkılaştır} \quad (26.a)$$

$$(\zeta_{D,x} + \zeta_{D,y} + \zeta_{D,z} < t_c \sigma_D)$$

ve

$$(\zeta_{C,x} + \zeta_{C,y} + \zeta_{C,z} < t_c \sigma_C)$$

geçerliyse genişlet (26.b)

$t_r$  ve  $t_c$  eşik değerleri sırasıyla 1 ve 0.1 alınmıştır.

### Uygulama ve Başarımlar

Bu çalışmada, Kartezyen ağ tabanlı akış çözücüsü kodları, açık (explicit) türev kullanan sonlu hacim teknikleri kullanılarak geliştirilmiştir. Kod geliştirme, sayısal benzetimler ve hızlandırıcı kontrolleri, ev tipi kişisel bilgisayarda (Intel® Core™ I5-3470 3.20-GHz işlemci, 12 GB RAM ve Visual FORTRAN derleyici) yapılmıştır. Doğrulama çalışması için, çift (basit) elips yapısı etrafında 16.7 milyon Reynolds sayısı ile 8.15 Mach sayısında ve 30 derece hücum açısındaki akış seçilmiştir. Bu çalışmanın seçilmesinin başlıca nedeni, bu akış altında hem yay şokunu hem de yüzey şoku aynı anda yakalayabilmeyi sağlamaktır. Gustaffson vd. (1991) tarafından “uyarlamalı strateji kullanan tüm çözücüler için meydan okuyan bir problem” olarak tanımlanan çift elips yapısının çözümünde, çözüm uyarlamalı ağ sonuçları test edilmiştir. Daha önceki çalışmalarda (Gustaffson vd., 1991; Désidéri vd., 1991; De Zeeuw, 1993; Balakrishnan ve Yousuf, 2017; Satofuka vd., 1993; Bonfiglioli vd., 2016) çözüm uyarlamalı bu Kartezyen tekniğin sürtünmeli (viscous) akışlar için kullanıldığına rastlanılmamıştır. Hâlbuki geometrik ve çözüm uyarlamalı Kartezyen ağ çözümü teknikleri, hem çözümün hızlanmasına yardımcı olmakta hem de artan vektör farklarının düşük seviyelerde tutulmasına yani çözümün hassasiyetinin artırılmasını sağlamaktadır.

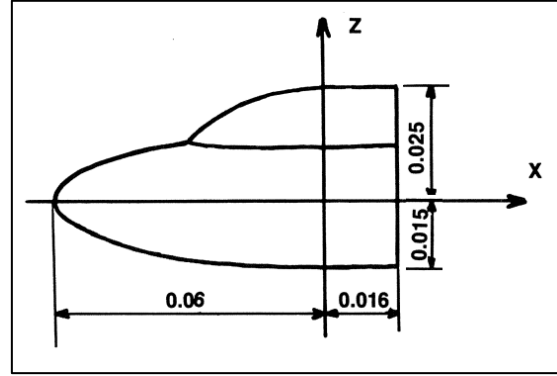
Problemin iki boyutlu geometrisi, Şekil 4’te gösterilmiştir. Aşağıdaki denklemlerle tanımlanır (Désidéri vd., 1991):

$$x \leq 0.0 \quad \left(\frac{x}{0.06}\right)^2 + \left(\frac{z}{0.015}\right)^2 = 1 \quad (27)$$

$$x \leq 0.0 \text{ ve } z \geq 0.0 \quad \left(\frac{x}{0.035}\right)^2 + \left(\frac{z}{0.025}\right)^2 = 1 \quad (28)$$

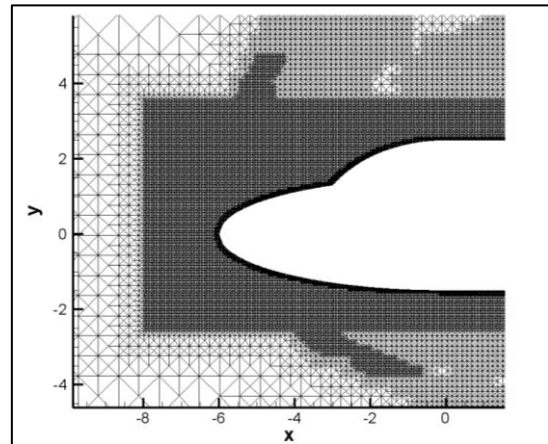
$$0.0 \leq x \leq 0.016 \quad \left(\frac{z}{0.015}\right)^2 = 1 \quad (29)$$

$$z \geq 0.0 \quad \left(\frac{z}{0.025}\right)^2 = 1 \quad (30)$$



Şekil 4. Denklem 27-28-29 ve 30 sonucunda oluşan iki boyutlu basit elips (elipsoit) geometrisi gösterimi (Désidéri vd., 1991)

Çift elipsin sınır şartlarında, Désidéri’nin çalışmasındaki koşullar temel alınmıştır. Gövde üzerinde havanın hızı,  $U_{duvar} = 0.0$  sınır şartındadır. Dirichlet sınır şartları uzak alan Mach sayısına,  $M_\infty$ ’a göre ayarlanmıştır. Uzak alan sıcaklık değeri,  $T_\infty = 56$  K olarak alınmıştır (Désidéri vd., 1991). Çözücüde kullanılan detaylı girdi parametreleri tablo 1’de verilmiştir.

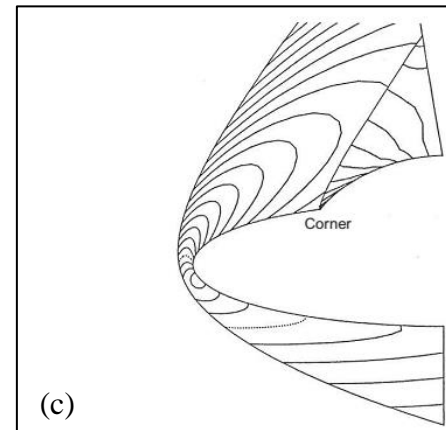
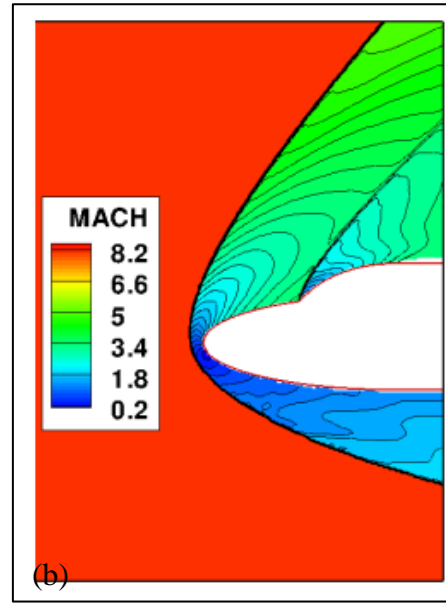
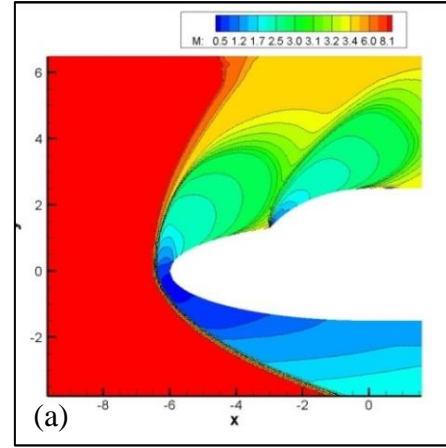


Şekil 5. Çift elips etrafındaki akışın (16.7 milyon Reynolds sayısı ile 8.15 Mach sayısı ve 30 derece hücum açısı) çözümünde kullanılan Kartezyen yöntemleriyle üretilmiş kutu geometri ve çözüm uyarlamalı ağ gösterimi

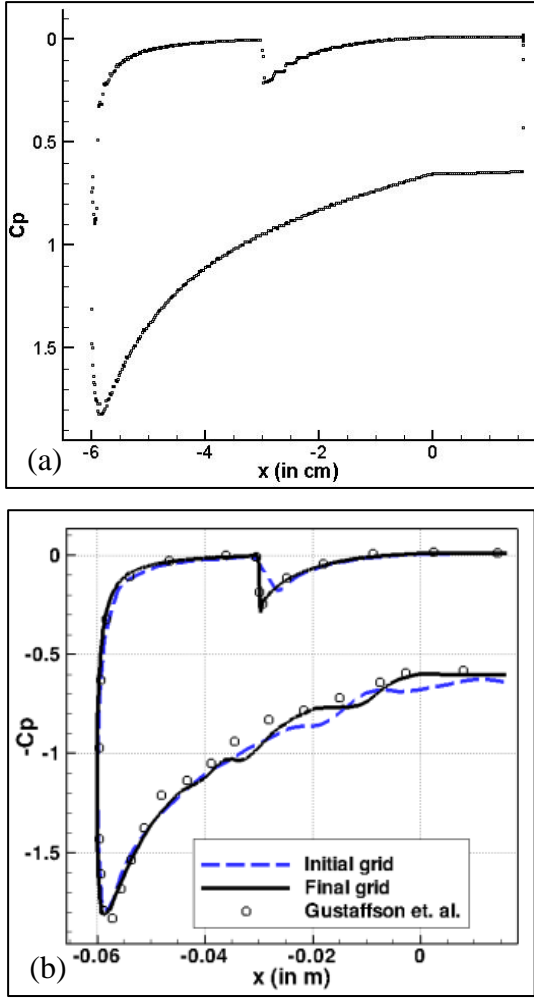
**Tablo 1.** Uygulamada kullanılan parametreler

Parametre türü	Tanım	Sayısal tanımı
Geometrik	Dış sınır boyutu katsayısı	18
Geometrik	Üniform ağ oluşturmak için ardışık bölme sayısı	4
Geometrik	Kutu adaptasyonu için xy düzleminde sınır katsayısı	x: 1.5; y:2.5
Sınır şartları	Mach sayısı	8.15
Sınır şartları	Hücum açısı	30
Sınır şartları	Reynolds sayısı	1670000
Sınır şartları	Prandtl sayısı (Laminar)	0.72
Sınır şartları	Prandtl sayısı (Türbülans)	0.90
Çözüm	Kademeli zaman adımlama sayısı	4
Çözüm	Seyrek-sık ağ döngü sayısı	3
Yakınsama	Artan (residual) yakınsama sınırı	$10^{-8}$
Yakınsama	Çok katmanlı ağ döngü sayısı	7

Bu doğrulama çalışması, Liou'nun yukarı iletimli ayrıştırma yöntemi (AUSM) kullanılarak çözülmüştür (Liou ve Steffen, 1993). Hesaplama ağının sık ağ dağılımı Şekil 5'te gösterilmiştir. Çok katmanlı ağ yöntemi ile akış çözücüsünün yakınsama oranı artırılmıştır. Sonuçlar yakın zamanlı çalışmalar ile karşılaştırılmış (Balakrishnan ve Yousuf, 2017; Satofuka vd., 1993; Bonfiglioli vd., 2016), yüzey etrafındaki hem yay burun şoku hem de keskin yüzey (canopy) şoku, referanslarla benzer şekilde, başarılı ve düzgünce akış çözücüsü tarafından yakalanmıştır (Şekil 6). Yapı çevresindeki Mach sayısı kontürleri başarılı şekilde benzetilmiş, referans çalışmalardaki gibi 0.2 ile 8.1 arasında değişmiştir. Yay burun şokunun olduğu gövdenin hemen önünde, Mach sayısının 8.1'den 0.2'ye dramatik bir şekilde düşüşü açıkça görülmektedir. Yüzey eğiminin değiştiği gövde kısmında ise kopma oluştuğu, ikincil bir şok; dolayısıyla ortalama Mach sayılarından (3.0-3.2) düşük Mach sayısına (0.2) düşüş olduğu gözlemlenmektedir.



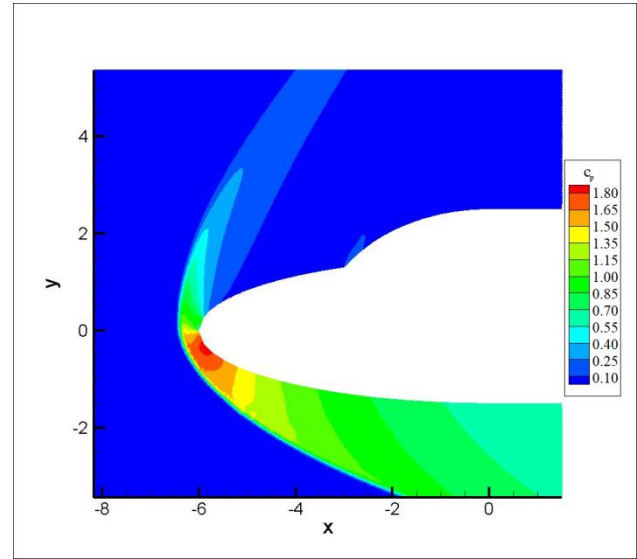
Şekil 6. Çift elips etrafındaki akışın (16.7 milyon Reynolds sayısı ile 8.15 Mach sayısı ve 30 derece hücum açısı) a) Kartezyen ağ çözümü sonucu ortaya çıkan, bu çalışmadaki; b) Balakrishnan ve Yousuf'un (2017) çalışmasındaki; c) Bonfiglioli vd.'nin (2016) çalışmasındaki Mach kontürleri



Şekil 7. Çift elips etrafındaki akışın a) bu çalışmadaki Kartezyen ağ yöntemleriyle çözülen, b) Gustaffson (1991) ve Balakrishnan ve Yousuf'un (2017) çalışmalarındaki basınç sabiti ( $c_p$ ) dağılımı sonuçları

Çift elips yapısının etrafındaki basınç sabitleri dağılımı Şekil 7 (a)'da elde edilmiştir ve Şekil 7 (b)'deki referans çalışmalarla (Gustaffson vd., 1991; Balakrishnan ve Yousuf, 2017) karşılaştırılmıştır. Referans çalışmalarda olduğu gibi, güçlü yay burun şokunun olduğu gövdenin hemen önünde (-6 cm civarı),  $c_p$  1.8 ile 0 arasında ani değişmekte; dolayısıyla şok oluşumunun sağlanması sayısal olarak da yapılabilmektedir. İkincil zayıf şok bölgesi olan -3 cm civarında da  $c_p$ , 0'dan 0.2'ye yükselip tekrar 0'a yavaş şekilde düşmektedir. Şok oluşmayan, gövdenin alt bölgesinde de  $c_p$ 'nin 1.8'den 0.7'ye yüzey boyunca kademeli olarak düştüğü gözlemlenmektedir. Sonuç olarak,

Mach sayılarının ani değişiklik gösterdiği noktalardaki şok oluşumları hem görsel olarak (Şekil 6) hem de sayısal olarak (Şekil 7) kanıtlanmış ve referans literatür çalışmalarıyla tutarlılık göstermiştir. Bu çalışmadaki  $c_p$  sonuçlarının (Şekil 7(a)) çift-elips yapısı çevresindeki dağılımı da kontür halinde Şekil 8'de gösterilmiştir. Kırmızı bölgede görüldüğü gibi  $c_p$  değeri geometrinin gövdesinin burun kısmının hemen altında maksimum olmaktadır. Ayrıca Şekil 6 (a)'daki yay şoku da gözlemlenebilmektedir.



Şekil 8. Çift elips etrafındaki akışın (16.7 milyon Reynolds sayısı ile 8.15 Mach sayısı ve 30 derece hücum açısı) Kartezyen ağ çözümü sonucu ortaya çıkan, bu çalışmadaki basınç sabiti ( $c_p$ ) dağılımı kontürleri

## Sonuçlar ve Tartışma

Geliştirilen Kartezyen temelli, çözüm uyarlamalı Navier-Stokes akış çözücüsü, akışların çözümü için çok katmanlı ağ yöntemleri de kullanılarak hızlı ve hassas bir şekilde çözülmüştür. Mevcut Kartezyen yöntemleri ve Spalart-Allmaras türbülans modeli ile çift elips etrafında oluşan akış benzetimi ev tipi bir bilgisayarda başarılmıştır. Çözülen çift elips doğrulama çalışması, birden çok referansla karşılaştırılmıştır. Hem Mach kontürleri hem de  $c_p$  değerleri büyük ölçüde tutarlılık göstermiştir.

Mach kontürlerinde hızlı değişimle de gözlenen iki şokun yakalanması çözüm uyarlamalı ağ

yöntemleri ile başarılmıştır. Bu şoklar, sırasıyla; biri hemen gövdenin önünde oluşan yay burun şoku, diğeri ise yüzeyde oluşan eğim değişimi nedeniyle oluşan gövde şokudur. Şekil 5’de gösterilen uyarlamalı ağ Şekil 6’da verilen referans sonuçları yakalamakta sadece yüzeyden uzak bölgelerde yetersiz kalmıştır. Bunun nedeni de şokların gövdeden uzak kısımlarında yeterli sıkılaştırma yapılmamış olmasıdır. Yeterli sıkılaştırma denenmiştir fakat bu sefer de şok çizgisini yakalamaktansa tüm çözüm bölgesinin sıkılaştırılması sonucuna varılmış ve çalışılan çözüm uyarlamasının bir etkisi görülmemiştir. Dolayısıyla, yüzeyden uzakta oluşan bu sorun sayısal olarak bir negatif etki yaratmadığı için göz ardı edilmiştir. Sonuçta, Mach sayılarının ani değişiklik gösterdiği noktalardaki şok oluşumları hem görsel olarak hem de sayısal olarak kanıtlanmış ve referans literatür çalışmalarıyla tutarlılık göstermiştir.

Gelecekte yapılması planlanan çalışmalar; (1) küt gövdelerin etrafındaki ısı akışının değişiminin bulunması için Kartezyen temelli akış çözücüsü geliştirilmesi, (2) şu anki çalışmanın üç boyutlu Kartezyen temelli akış çözücüsünde benzetimi (3) modifiye edilmiş bir denklemlerle RANS-SA türbülans modelleri ve/veya iki denklemlerle türbülans modellerinin akış çözücüsüne entegre edilmesidir.

## Semboller

$c_p$ :	basınç sabiti
$C$ :	sabit basınç altında özgül ısı ( $J/g-K$ )
$C_{suth}$ :	Sutherland sabiti
$e$ :	özgül iç enerji ( $J/g$ )
$E$ :	toplam enerji ( $J$ )
$F$ :	konvektif akı vektörü
$FF$ :	zorlama fonksiyon
$G$ :	difüzyif akı vektörü
$h$ :	ağ aralığı
$H$ :	toplam entalpi ( $J$ )
$I$ :	sıktan seyreğe daraltma operatörü
$L$ :	doğrusal olmayan operatör
$q$ :	difüzyif akı ( $W/m^2$ )
$Q$ :	çözüm vektörü
$Q$ :	korunan değişkenin vektörü
$S$ :	türbülans kaynak terimi
$Pr$ :	Prandtl sayısı
$Res$ :	artan (kalıntı-residual) vektörü

$t_c$ :	genişletme alt sınırı
$t_r$ :	sıkılaştırma alt sınırı
$T$ :	akışkan sıcaklığı ( $K$ )
$u$ :	$x$ -hız bileşeni ( $m/s$ )
$v$ :	$y$ -hız bileşeni ( $m/s$ )
$\gamma$ :	özgül ısı oranı
$\lambda$ :	yığın viskozite ( $Pa.s$ )
$\mu$ :	moleküler viskozite ( $Pa.s$ )
$\rho$ :	yoğunluk ( $kg/m^3$ )
$\zeta$ :	kontrol hacminin karakteristik uzunluğu
$\sigma$ :	standart sapma
$\tilde{v}$ :	SA işleyen değişkeni
$\tau_{ij}$ :	viskoz gerilme elemanı ( $Pa$ )

## Kaynaklar

- Balakrishnan, N. ve Yousuf, M., (2017). Residual based grid adaptation for meshless LSFU-U solver, Proceedings, 23rd AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, 3104, 1–15, Denver.
- Berger, M. ve Aftosmis, M., (2012). Progress towards a Cartesian cut-cell method for viscous compressible flow, Proceedings, 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 1301, 1–24, Nashville, Tennessee.
- Blazek, J., (2015). Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications, 466, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Bonfiglioli, A., Paciorri, R., Nasuti, F., ve Onofri, M., (2016) Moretti's shock-fitting methods on structured and unstructured meshes, in Abgrall, R. ve Shu, C., eds, Handbook of Numerical Analysis, Elsevier, 403–439, Amsterdam.
- Bungartz, H. J., Mehl, M., Neckel, T., ve Weinzierl, T., (2010). The PDE framework Peano applied to fluid dynamics: an efficient implementation of a parallel multiscale fluid dynamics solver on octree-like adaptive Cartesian grids, Computational Mechanics, 46, 1, 103-114.
- Chung, M. H. (2013). An adaptive Cartesian cut-cell/level-set method to simulate incompressible two-phase flows with embedded moving solid boundaries. Computers & Fluids, 71, 469-486.
- Çakmak, M., (2009). Development of a multi-grid accelerated Euler solver on adaptively refined two and three-dimensional Cartesian grids, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara.
- De Zeeuw, D. L., (1993). A quadtree-based adaptively-refined Cartesian-grid algorithm for solution of the Euler equations, Doktora Tezi, Michigan Üniversitesi, ABD.
- Désidéri, J. A., Glowinski, R. ve Périaux, J., (1991). Problem 6: Double (Simple) Ellipsoid, in



- Désidéri, J. A., Glowinski, R., Périaux, J., eds, Hypersonic Flows for Reentry Problems, Springer, 17–24, Berlin.
- Gustaffson, B., Part-Enander, E. ve Sjogreen, B., Solving flow equations for high Mach numbers on overlapping grids, in Désidéri, J. A., Glowinski, R., Périaux, J., eds, Hypersonic Flows for Reentry Problems, Springer, 585–589, Berlin.
- Hartmann, D., Meinke, M. ve Schröder, W. (2008). An adaptive multilevel multigrid formulation for Cartesian hierarchical grid methods. *Computers & Fluids*, 37, 9, 1103-1125.
- Jameson, A. (1985). Multigrid algorithms for compressible flow calculations, in Hackbusch W., Trottenberg, U., eds, *Multigrid Methods II*, Springer Press, 166–201, Berlin, Heidelberg.
- Kara, E., (2017). Determination of the wall function for Navier-Stokes solutions on Cartesian grids, *Proceedings, 2nd Workshop on Nonlinear PDEs in Applied Mathematics*, İzmir.
- Liou, M. S. ve Steffen Jr, C. J., (1993). A new flux splitting scheme, *Journal of Computational physics*, 107, 1, 23-39.
- Marshall, D. (2003). Fully automated Cartesian grid CFD application for MDO in high speed flows. *Teknik Rapor 1606R84*, NASA, California.
- Özgün, M. ve Eyi, S., (2014). Atmosferik geçiş yapan araç etrafında Navier-Stokes denklemleri ile üç boyutlu hipersonik akış analizi, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 2, 7, 1–7.
- Satofuka, N., Morinishi, K. ve Oishi, T. (1993). Numerical solution of the kinetic model equations for hypersonic flows. *Computational Mechanics*, 11, 5-6, 452-464.

## Analysis of high Reynolds number flow around a double ellipsoid configuration using solution adapted Navier-Stokes solver

### Extended abstract

*In this study, high Reynolds number and Mach number (hypersonic) flow around a double ellipse configuration with 30° angle-of-attack is analyzed by a Cartesian based flow solver. Pressure coefficients are obtained with Liou's AUSM methodology (Liou and Steffen, 1993). Accurate solutions around two-dimensional double ellipse configuration are generated for turbulent and compressible flow conditions. Flow solver is accelerated and converged with the use of multi-grid methods. Results are compared with recent studies from literature. Both bow shock around the nose of the configuration and sharp canopy shock on the body are captured well by the flow solver. Moreover, Mach number contours are successfully simulated as in these reference studies.*

*After spatial and temporal discretizations of the corresponding problem's solution domain, the most crucial pitfall encountered was convergence. Among the popular multi-grid solution methods (Jameson, 1985) "Full Approximation Storage (FAS)" multi-grid technique is selected for nonlinear viscous flow solution to accelerate the convergence.*

*Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with the Spalart-Allmaras turbulence model closure; in short RANS-SA equations are employed for two-dimensional, compressible and viscous flows that are integrated in the solution domain. As Özgün and Eyi (2014) stated, Spalart-Allmaras (SA) turbulence model uses less CPU, meanwhile gives acceptable guesses for pressure coefficients on the solid body and the flow separation locations. SA model (Kara, 2017) uses a working variable,  $v$ , to solve eddy viscosity,  $\mu$ . Thus, addition of these variables in the partial differentials of SA closes the RANS and forms the RANS-SA equations.*

*According to the criteria suggested in literature (Marshall, 2003) for maximum/minimum values of threshold parameters, solution adaptation is studied for the flow solution around double ellipse configuration and shock locations are captured correctly.*

*In this study, Cartesian grid based flow solver codes are developed using finite volume techniques. Code development and numerical simulations are studied on a personal computer (Intel® Core™ I5-3470 3.20-GHz processor, 12 GB RAM and Intel® Visual FORTRAN compiler). For the validation study, the double (simple) ellipse structure is selected with a 16.7 million Reynolds number around 8.15 Mach number and 30 degrees of attack flow. The main reason for choosing this study is to ensure that both the bow shock and the surface (canopy) shock can be caught simultaneously. The solution adaptive grid results are tested in the solution of the double ellipse structure. This structure has been defined as a challenge by Gustaffson et al. (1991) for all flow solvers using adaptive techniques. As recent studies surveyed (Gustaffson et al., 1991; Désidéri et al., 1991; De Zeeuw and Powell, 1993; Balakrishnan and Yousuf, 2017; Satofuka et al., 1993; Bonfiglioli et al., 2016) currently proposed, solution-adapted Cartesian technique was not used for viscous flow. However, the geometric and solution-adaptive Cartesian grid solution techniques not only help to accelerate the solution, but also ensure that the residuals are kept at low levels, that are, increasing the accuracy of the solution.*

*The solution of the two shocks (bow and canopy) observed with rapid change in Mach contours has been achieved by adaptive grid methods. These shocks are; one of them is a bow nose shock that occurs upstream of the body, and the other is a canopy shock caused by a sharp change in slope on the surface. The adaptive grid shown in Figure 5 was not sufficient to capture the reference results away from the body (farfield) as given in Figure 6. The reason for this is that the shocks are not sufficiently refined in farfield from the body. Sufficient refinement was tried but this time it was concluded that the whole solution area was refined rather than capturing the shock line and no positive effect of the solution adaptation was observed. Therefore, this problem, which occurs away from the surface, has been neglected because it does not have a negative effect. As a result, the shock formations at the points of sudden changes of the Mach numbers are both visually and numerically proven and consistent with the reference literature studies.*

**Keywords:** Cartesian grid, double ellipse configuration, solution adaptation, multi-grid method, High Reynolds number flow.



# Kireç oranındaki değişimin erozyon korozyonuna etkisinin sonlu elemanlar analizi ile araştırılması

**Deniz Ada\***

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kimya Teknolojileri Bölümü, Kütahya, [hdenizada@hotmail.com](mailto:hdenizada@hotmail.com), ORCID: 0000-0001-9991-8396

**Kadir Gök**

İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, İzmir, [kadirgok67@hotmail.com](mailto:kadirgok67@hotmail.com) ORCID: 0000-0001-5736-1884

Geliş: 16.05.2019, Revizyon: 21.06.2019, Kabul Tarihi: 26.06.2019

## Öz

*Bu çalışmada sıvı akışkanın içindeki kireç oranının korozyona etkisi bilgisayar destekli akış analizleri kullanılarak belirlenmesi yöntemi uygulanmıştır. Kireç konsantrasyonundaki değişimin, yuvarlatılmış bir dirsek borudaki erozyon korozyonuna etkisini görebilmek hedeflenmiştir. Petro-kimya endüstrisinde kullanılan borular farklı türde akışkanları bir yerden bir yere taşımakla görevlidirler. Bir dirsek boru tasarımı göz önüne alınarak 3 boyutlu çalışmalar için SolidWorks programı kullanılmıştır. Boru içi akış analizleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı Ansys Fluent kullanılarak sonlu hacim metoduna dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, 3 farklı kireç partikül oranı seçilmiştir. Analiz sonunda, farklı kireç oranlarında borularda oluşan erozyon miktarları elde edilmiştir. Kireç oranı arttıkça, dirsek borulardaki korozyon oranında artış görülmüştür.*

**Anahtar Kelimeler:** Kireç etkisi, erozyon, sonlu elemanlar metodu, korozyon.

\*Yazışmanın yapılacağı yazar

## Giriş

Korozyon, metallerin çevreleriyle yaptıkları kimyasal ya da elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu hasar görmeleri olayına denir. Bu reaksiyonlar sonucunda metallerin fiziksel, kimyasal, mekanik ve elektriksel özelliklerinde istenmeyen durumlar vuku bulmaktadır. Bu durumlar metal malzemelerden üretilen parçaların kullanılamaz hale gelmesine yol açmaktadır. Metalik yapıların üretiminde metal yüksek enerjili bir hal almaktadır. Düşük enerjili haline tekrar geri dönmek için güçlü bir eğilime sahiptir. Bu doğal hale dönüş korozyon meydana getirir. Korozyon bir çukur ya da çatlak şeklinde lokal olarak ya da geniş bir alan boyunca uzanan genel bir bozulma şeklinde oluşabilir (Eddy 2010, Aytaç, Özmen and Kabasakaloğlu 2005). Metal ve alaşımlarının kuru ve gaz ortamda oksitlenmesine kimyasal korozyon denilirken, anot, katot, elektrolit ve anot ve katot arasındaki elektron iletimini sağlayacak bir elektron iletkenin bulunduğu ortamda gerçekleşen korozyona kimyasal korozyon denilmektedir. Korozyon istenmeyen bir durumdur ve birçok türü mevcuttur. Yenme, aşınma, darbe, ve oyulmalara neden olan mekanik faktörlerle birleştiğinde korozyonun neden olduğu ekonomik kayıplar çok yüksek değerlere çıkmaktadır (Trabanelli 1977, Trabanelli, Mantovani and Zucchi F. 1988).

Genel korozyon, galvanik korozyon, erozyon korozyonu, kavitasyon korozyonu, aralık korozyonu, çukurcuk korozyonu, taneler arası korozyon, gerilmeli korozyon ve yorulmalı korozyon en önemli korozyon türleri arasındadır (Mehmet Yüksel and Meran 2010). Elektrokimyasal korozyon ölçümleri Tafel Analiz, Lineer Polarizasyon ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi Teknikleri ile yapılır (Ada et al. 2016). Sıvı ve gazların uzak mesafelere taşınmasında kullanılan boru hatları, sıcak buhar kazanları ve türbin kanatları katı ve sıvı akışkanlar tarafından metal yüzeylerinde sürekli olarak aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Metal yüzeyinde bir pasif tabaka oluşsa da akışkan

bu pasif tabakayı tekrar yok ederek metal yüzeyinde erozyona sebep olacaktır. Kavitasyon olarak da bilinen oyuk hasarları, bir çeşit erozyonlu korozyondur. Bu korozyon türü, boru içinde hızlı olarak akan akışkanın yüzeylere yakın bölgelerde meydana gelen alçak basınç kabarcıklarının büyümesi sonunda patlaması ile oluşur. Bu şok dalgalar sonucunda malzeme yüzeyi tahrip olur. Tahrip sonucu ortaya çıkan metal çözünerek korozyona uğramaktadır. Bu korozyonlu yüzeyler kaba ve sık oyuklara sahip peteksi bir görünüme sahiptirler (Ada 2014).

Erozyon korozyonu petro-kimya endüstrisinde çok sık olarak karşılaşılan bir korozyon türüdür (Şekil 1). Gaz ve sıvı akışkanların uzak mesafelere kadar taşınmasında kullanılan teçhizat borularında, kömür yada maden cevherlerinin toz halinde su ile karıştırılarak uzak mesafelere kadar taşınmasını sağlayan boru hatlarında, sıcak su ve buhar hazırlama tesislerinde görülmektedir (Mehmet Yüksel and Meran 2010). Bunun yanı sıra, boru içindeki akışım daralma gösterdiği ve yön değiştirdiği bölgeler, gaz akıntılarının katıyı ve sıvıyı sürüklediği durumlar, türbülansın meydana geldiği bölgeler, pompa gövdeleri, boru ağızları, vana oturma yüzeyleri, yoğunlaştırucular, fırın tüplerinin girişleri, boru eklenti parçaları ve ısı çiftlerinin çevresinde görülmektedir (MEGEP 2012).



Şekil 1. Erozyon korozyonunun boru iç yüzeyinde görünümü (MEGEP 2012)

Kirecin korozyona etkisi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Kuyulardan elde edilen sular da en az deniz, göl ve akarsu gibi yüzey kaynakları kadar soğutma sistemleri için kullanılabilir. Fakat, su içeriğinde bulunan gazlar, çözünmüş mineraller ve kireçten dolayı bu sistemlerde korozyon, kirlenme ve mikrobiyolojik oluşumlara sebep olmaktadır (KILIÇCIOĞLU 2014). Küçükgül ve Özdağlar (Küçükgül E. Y and D 2004), Tahtalı Barajı'ndan temin edilen içme sularının korozyon etkisinin boru ve donanımında büyük zararlara yol açtığını, özellikle litrede 60 mgr'ın altında  $\text{CaCO}_3$  içeren suların Cu içeren borularla transferinde akış hızından kaynaklanan etkin saldırıdan dolayı büyük zararlar meydana geldiğini söylemişlerdir.  $\text{Cl}^-$  iyonları ile yaptıkları deneysel çalışmada 0,77m/sn, 1,42m/sn ve 1,42m/sn hızlar kullanmışlardır. Sonuç olarak polietilen boru malzeme önermişlerdir. Büyüksağış tarafından yapılan bir çalışmada (Büyüksağış A 2007), jeotermal sistemlerde, kabuklaşma ve korozyonun çok önemli bir sorun olduğunu belirtmiştir. XRD analizleri sonucunda, şehir dışı jeotermal ısıtma boru hattında  $\text{CaCO}_3$  kabuklaşması olduğunu, şehir içi kuyu suyu geçen boru hattında ise  $\text{NaCa}(\text{OH})$ ,  $\text{CaCO}_3$  ve  $\text{MgAlSi}$  içeren bir kabuksu oluşumun meydana geldiğini bildirmiştir. Çukur korozyonunun  $\text{NaCl}$  ile yumuşatılan kuyu suyunun geçtiği boru hattında meydana geldiğini, benzer bir durumun jeotermal suyun geçtiği borularda da gerçekleştiğini bildirmiştir. Ayrıca, geri dönüş hattındaki sularında çözünmüş partikül miktarının artmasıyla birlikte St 37 çelik malzemenin suyun etkisiyle erozyona uğrayarak korozyona uğradığını söylemiştir.  $\text{Cl}^-$  iyonlarının varlığında çukur korozyonu ihtimali de arttığından Fiberglas plastik boruların kullanımını ve katodik koruma yöntemini önermiştir.

Bu tür uygulamalarda bilgisayar destekli simülasyon araçları kullanarak akışkanın oluşturacağı korozyon tahribatı önceden tahmin edilerek farklı çözüm yöntemleri bulunabilir. Konu ile ilgili literatürde birkaç çalışma mevcuttur. Mansouri vd. (Mansouri et

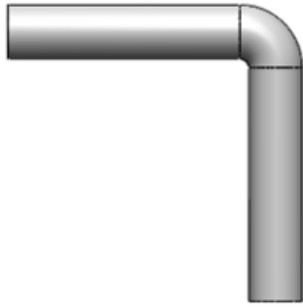
al. 2015) duvar yakınındaki türbülans modelini ve küçük partiküllerin sebep olduğu erozyonun CFD modelini geliştirmişlerdir. Hassan-Beck vd. (Hassan-Beck et al. 2019) dirsek, boru genişletici nozul çıkışındaki ilgili alanlarda, erozyon üzerinde akışın etkisini incelediler. Doroshenko vd. (Doroshenko et al. 2019) yoğunlaşmış damlacıkların hareketinin fiziksel görüntüsünü elde etmek için akış analizleri elde etmişlerdir. Pati vd. (Patil and Bhojwani 2018) katı parçacık erozyonu mekanizması ve çeşitli faktörlerin etkisini incelemişlerdir. Kumar vd. (Kumar et al. 2017) tarafından boru hattının katı-sıvı süspansiyonuna bağlı olarak erozyon aşınma davranışı ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu FLUENT kullanılarak incelenmiştir. Mohyaldinn vd. (Mohyaldinn, Noaman and Ismail 2011), Salama modeli ve Doğrudan Çarpma Modeli (DIM) modeli, boru bileşenlerinde parçacıkların (kum) erozyonunun öngörülmesi için bir hesaplama kodu geliştirmişlerdir. Bu iki model, CFD Fluent ticari yazılımından elde edilen sonuçlara karşılaştırılmıştır.

Erozyon korozyonunun önlenmesi için birkaç yöntem mevcuttur. Öncelikle aşınmayı önlemek için bazı tedbirlerin alınması gerekir. Özellikle tasarım aşamasında müdahale etmek maliyet açısından çok önemlidir. Akış yönünün değiştirilmesi gereken uygulamalarda geniş açılı dirsekler, cidar kalınlığı aşınmaya karşı dayanıklı malzeme kullanmak ve korozyon payı gibi önlemler alınabilir. Bu çalışmada, boru içi akış analizleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı Ansys Fluent kullanılarak sonlu hacim metoduna dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Sıvı akışkanın içindeki kireç oranının korozyona etkisinin bilgisayar destekli akış analizleri ile belirlenmesi hedeflenmektedir.

## Materyal ve Yöntem

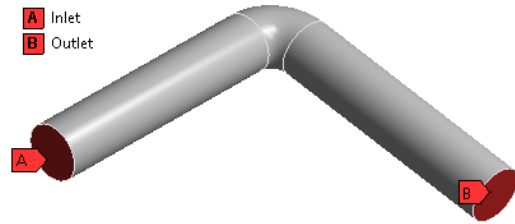
Yuvarlatılmış bir dirsek boru için 3 boyutlu (3D) modeller SolidWorks programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).

Boru içi akış analizleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı Ansys Fluent kullanılarak sonlu hacim metoduna dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. 3D model oluşturulduktan sonra, Ansys Workbench programında akış analizlerinde akışkan olarak kullanılacak sıvının (su) özellikleri girilmiştir. Sıvının taşıyacağı partikül için ise kireç ( $\text{CaCO}_3$ ) seçilmiştir. Sıvının ve partikülün özellikleri Tablo 1' de verilmiştir.

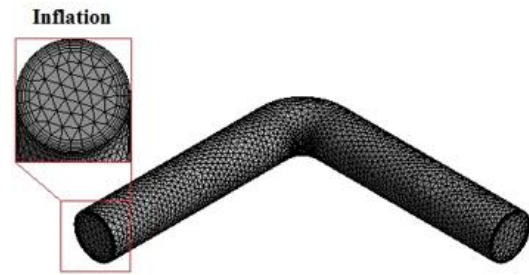


Şekil 2. Yuvarlatılmış bir dirsek boru 3D modeli

(Şekil 3) belirlendikten sonra ağ (mesh) işlemi gerçekleştirilir. Ağ işlemlerinde modelin tamamı için üçgen (triangle) eleman tipi seçilmiştir. Bu işlem için eleman boyutu 0,017 mm olarak belirlenmiştir. Ağ işlemi sonrasında sonlu hacim modeli 20224 düğüm ve 52624 elemana sahiptir. Ağ işlemi Şekil 4' de görülmektedir. Akış analizlerinin tamamında başlangıç hızı borunun Inlet yüzeyinden 0,5 m/sn olarak seçilmiştir



Şekil 3. Akışkanın giriş ve çıkış yüzeyleri



Şekil 4. Sonlu eleman modelinin ağ yapısı

**Tablo 1.** Suyun ve partikülün özellikleri

Sıvı ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Değerler
Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	998.2
Viskozite ( $\text{kg/m-s}$ )	0.001003
Su Hızı (m/sn)	0.5
Başlangıç Gösterge Basıncı (Pa)	78000
Partikül ( $\text{CaCO}_3$ )	
Çap (m)	0.015
Çap Dağılımı	Uniform
Kireç Akış Oranı (mg)	60-120-180 (Küçükgül E. Y and D 2004)
Sürekleme Kanunu	Küresel

### Yükleme ve Sınır Şartları

Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra sınır şartları belirlenir. Geometrik modeller üzerinde akışkanın giriş ve çıkış yüzeyleri

Literatürde birçok ampirik erozyon ilişkisi yayınlanmıştır. Bunların hepsi çarpma açısı, darbe hızı, parçacık çapı, parçacık kütlesi ve buna bağlı çarpışma frekansını içerir. Tipik bir erozyon modeli aşağıdaki genel forma sahiptir. ANSYS Fluent'te varsayılan erozyon akış dinamik modeli Denklem (1)' deki gibidir.

$$ER = \sum_{p=1}^{N_{particles}} \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v_p^n}{A_{face}} \quad (1)$$

burada,

$m_p$  : parçacıkların kütle akış hızı,

$f(\alpha)$  : darbe açısı fonksiyonu,

$C(d_p)$  : partikül çap fonksiyonu,

$v_p$  : partikül darbe hızı,

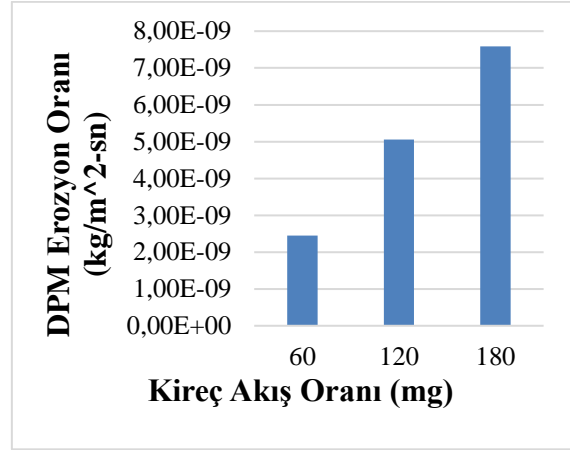
$n$  :hız üssü,  
 $A_{face}$  :duvardaki hücre yüzeyinin alanı.

Çözüm, k-epsilon (2 eqn) türbülanslı akış modeli seçilerek ve toplam 150 iterasyonda gerçekleştirilmiştir. k-epsilon modeli olarak Standard model, çözüm yöntemi olarak SIMPLE çözüm yöntemi seçilmiştir. Türbülans modelinde kullanılan model sabitleri, Cmu: 0.09, C1-Epsilon: 1.44, C1-Epsilon: 1.92 olarak program tarafından önerilmiştir. 0.00006 kg/s, 0.00012 kg/s ve 0.00018 kg/s (Küçükgül E. Y and D 2004) olmak üzere 3 farklı partikül akış oranı seçilmiştir.

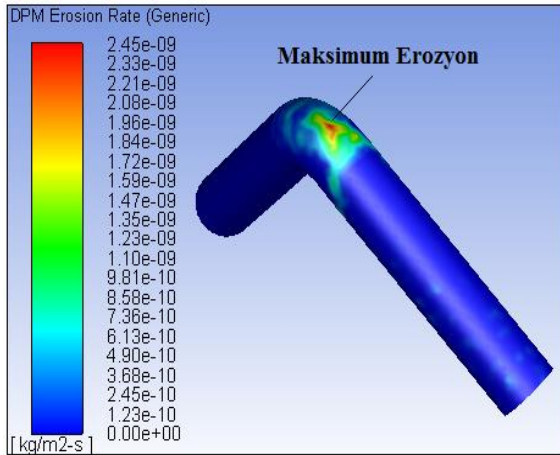
### Bulgular ve Tartışma

Yükleme ve sınır şartları girildikten sonra analizler çözdürülmüştür. Erozyon oranı Şekil 5' de grafiksel olarak, Şekil 6'da ise

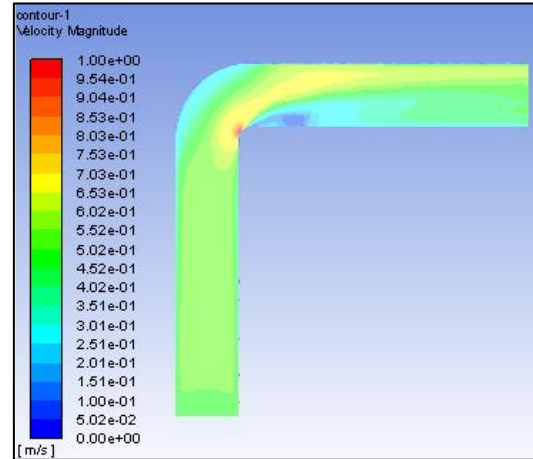
erozyon oranı akış hızı, basınç, türbülans kinetik enerji ve türbülans girdap dağılımı renk değişimi olarak gösterilmiştir. Kireç oranı 60 mg iken erozyon oranı 2,45E-09 kg/m<sup>2</sup> sn, 120 mg iken erozyon oranı 5,06E-09 kg/m<sup>2</sup> sn, 180 mg iken erozyon oranı 7,59E-09 kg/m<sup>2</sup> sn olarak analiz edilmiştir.



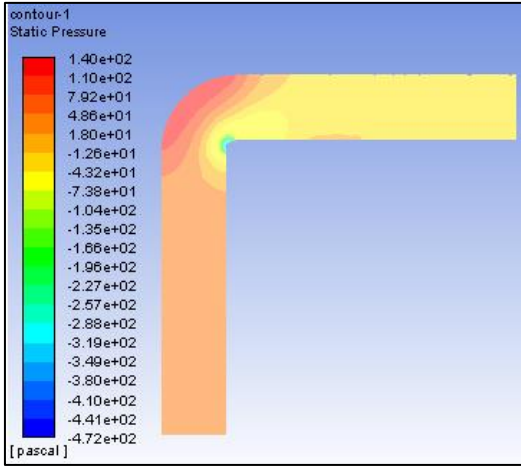
Şekil 5. Erozyon oranı



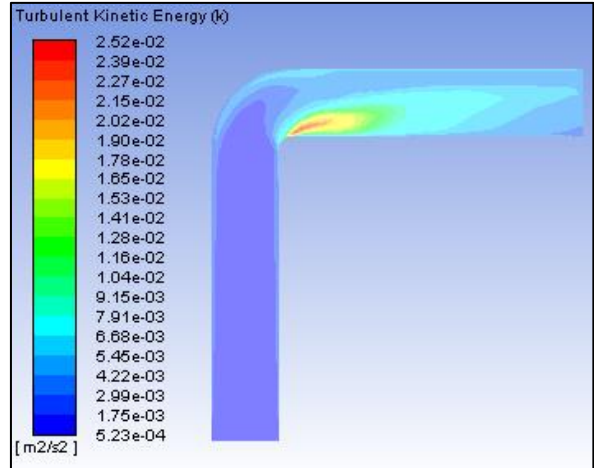
a)



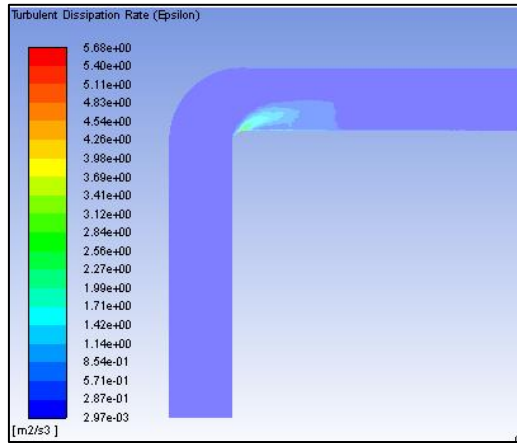
b)



c)



d)



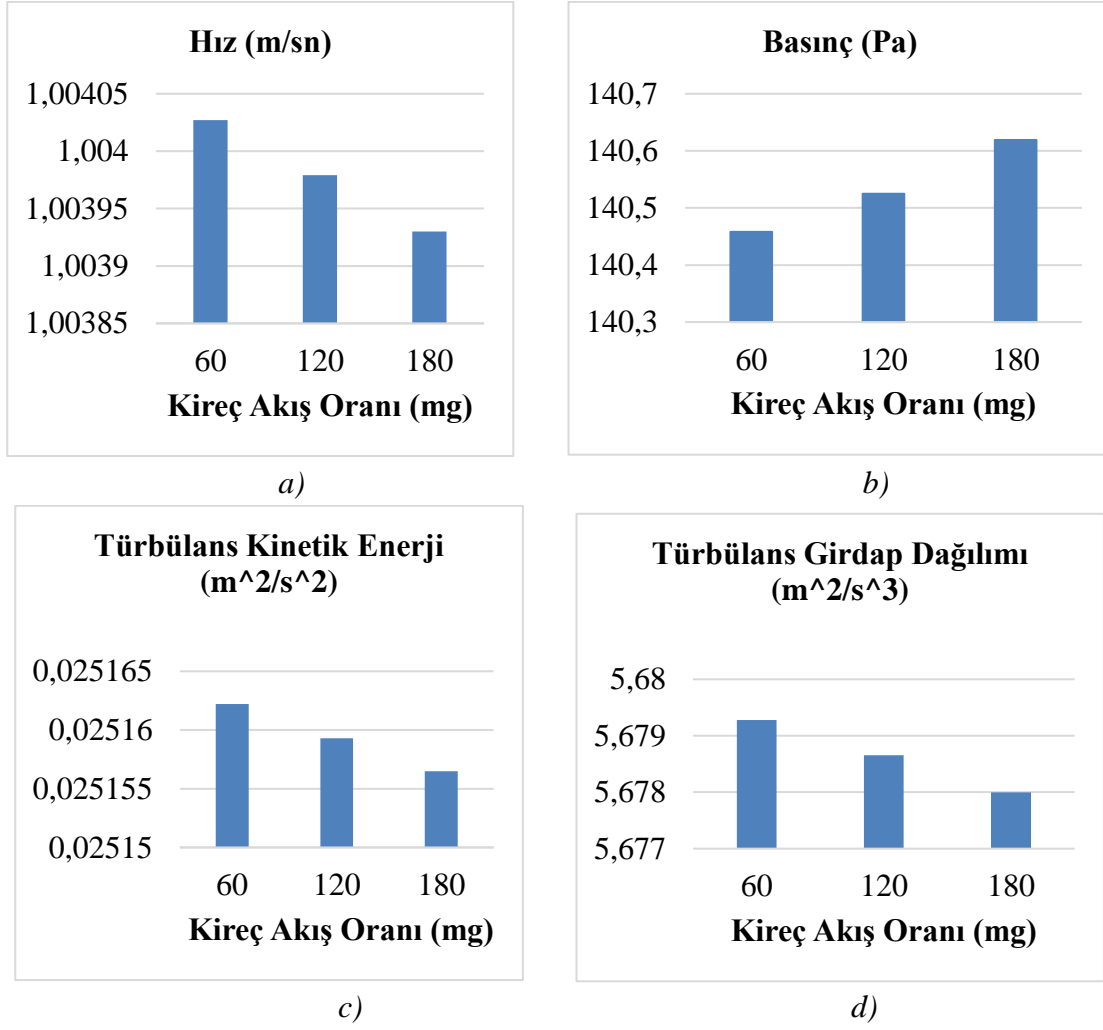
e)

Şekil 6. a) DPM Erozyon oranı, b) akış hızı, c) basınç, d) türbülans kinetik enerji ve e) türbülans girdap dağılımı

Ayrıca, akış hızları, basınç, türbülans kinetik enerji ve türbülans girdap dağılımları, Şekil 7’de gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, kireç oranındaki artış, akışkan hızında çok düşüğe olsa azalmaya neden olmaktadır. Kireç (partikül) oranındaki artış akışkanın hızını zayıflatmaktadır. Artan partikül

oranıyla bu azalmanın daha da artması beklenmektedir. Türbülans kinetik enerji ve türbülans girdap dağılımındaki azalmanın sebebidir akış hızındaki azalmaya bağlıdır. Akış hızının azalması boru içindeki basıncın artmasına sebep olacaktır.





Şekil 7. Akış analizleri sonuçları, a) akış hızı, b) basınç, c) türbülans kinetik enerji, d) türbülans girdap dağılımı

## Sonuçlar

Petro-kimya endüstrisinde akışkan taşımada yaygın olarak kullanılan boruların içindeki kireç gibi partiküller ya da çözülmüş diğer bazı mineraller belirli bir süre sonra boruda korozyon oluşumuna sebep olabilmektedir. Analiz sonuçlarına göre, kireç oranındaki artış, akış hızı, basınç ve türbülans değerlerinde çok az bir değişime neden olurken, erozyon korozyonunda ise kireç oranı ile orantılı bir artışa sebep olmaktadır.

## Kaynaklar

- AnsysWorkbench Fluent Materials.  
<https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node818.htm>.
- Ada, H. D. 2014. Ankara Şeker Fabrikası'nda değişik ünitelerden alınan şerbet örneklerinde çelik türlerinin korozyon direnç ölçümleri, uygun malzeme seçimi ve maliyet analizi çalışmaları In *Kimya Anabilim Dalı / Fizikokimya Bilim Dalı*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü
- Ada, H. D., S. Altanlar, F. Erdem & G. Bereket, (2016). Investigation of corrosion resistance of steel used in beet sugar processing juices *International Journal of Industrial Chemistry*, **7**, 431-439.
- Aytaç, A., Ü. Özmen & M. Kabasakaloğlu, (2005). Investigation of some Schiff bases as acidic corrosion of alloy AA3102 *Materials Chemistry and Physics*, **89**, 176-181.
- Büyüksağış A, (2007). Afyonkarahisar jeotermal ısıtma sisteminde oluşan kabuklaşma ve korozyon *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, **31** 9-24.
- Doroshenko, Y., J. Doroshenko, V. Zapukhliak, L. Poberezhny & P. Maruschak. 2019. *Modeling computational fluid dynamics of multiphase flows in elbow and T-junction of the main gas pipeline*.
- Eddy, N. O., (2010). Part 3. Theoretical study on some amino acids and their potential activity as corrosion inhibitors for mild steel in HCl *Molecular Simulation*, **36**, 354-363.
- Hassan-Beck, H., T. Firmansyah, M. I. Suleiman, T. Matsumoto, M. Al Musharfy, A. H. Chaudry & M. A. Rakib, (2019). Failure analysis of an oil refinery sour water stripper overhead piping loop: Assessment and mitigation of erosion problems *Engineering Failure Analysis*, **96**, 88-99.
- Kiliçcioğlu, F., (2014). Su soğutmalı santrallerde korozyon ve birikinti oluşumunun engellenmesi için uygulanan kimyasal koşullandırma programları *Jeotermal Enerji Semineri*, 307-318.
- Kumar, S., J. P. Singh, P. Kumar & S. K. Mohapatra, (2017). CFD modeling of erosion wear in pipe bend for the flow of bottom ash suspension AU - Singh, Jashanpreet *Particulate Science and Technology*, 1-11.
- Küçükgül E. Y & Ö. D, (2004). İçme suyunda Agresivitenin saptanması ve şebekede korozyonun önlenmesi *DEÜ Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi*, **6**, 19-39.
- Mansouri, A., H. Arabnejad, S. Karimi, S. A. Shirazi & B. S. McLaury, (2015). Improved CFD modeling and validation of erosion damage due to fine sand particles *Wear*, 338-339, 339-350.
- MEGEP. 2012. *Yüksek Sıcaklık Ve Erozyon Korozyonu*. Ankara.
- Mehmet Yüksel & C. Meran. 2010. *Malzeme Bilgisine Giriş*. Ankara: TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- Mohyaldinn, M., E.-K. Noaman & M. Ismail. 2011. *Evaluation of Different Modelling Methods Used for Erosion Prediction*.
- Patil, P. A. & V. K. Bhojwani, (2018). Investigation of erosion phenomena and influencing factors due to the presence of solid particles in the flow: a review AU - Shinde, Suhas M *International Journal of Ambient Energy*, 1-9.
- Trabanelli, G. M., G. Zucchi, F. . 1977. *Corrosion control in the beet sugar industry* Information Systems Division, National Agricultural Library.
- Trabanelli, G., G. Mantovani & Zucchi F., (1988). Corrosion Control in The Sugar *Industrie Sugar Tech. Rew.*, **1**, 1-27.

## Investigation of lime effect with finite element analysis in erosion corrosion

### Extended Abstract

*This study includes the determination of the corrosion effect of the lime content in the liquid fluid using computer aided flow analysis. Pipes used in the petro-chemical industry are responsible for transporting different types of fluids from one place to another. SolidWorks program is used for three dimensional studies considering an elbow pipe design. Intra-pipe flow analyses are performed based on the finite volume method by using computational fluids dynamics program-Ansys Fluent. In analyzes, 3 different lime particle ratios were selected. At the end of the analysis, erosion rates in pipes were obtained at different lime ratios.*

*The corrosion rate in the elbow pipes increases with increasing of lime ratio. 3D models for a rounded elbow pipe were performed using the SolidWorks program (Figure2). Intra-flow flow analyzes were performed based on finite volume method using the computational fluid dynamics program Ansys Fluent. After the 3D model was created, the properties of the fluid (water) to be used as fluid in flow analyzes were entered in Ansys Workbench program. The input and output surfaces of the fluid and the network structure of the finite element method are given together; after the loading and boundary conditions were entered, the analyzes were solved.*

*Erosion rate is shown as graphical in Figure 5 and as color distribution in Figure 6. While the lime ratio was 60 mg, the erosion rate was  $2,45E-09$  kg / m<sup>2</sup> sec, 120 mg, while the erosion rate was  $5,06E-09$  kg / m<sup>2</sup> sec, 180 mg and the erosion rate was  $7,59E-09$  kg / m<sup>2</sup> sec. According to the results of the analysis, the increase in lime ratio cause a little change in fluid velocity, pressure and turbulence values. A linear increase in erosion rate was observed,*

**Keywords:** *Lime effect, erosion, finite element method, corrosion*



## Frezeleme işleminde silici uç kullanımının incelenmesi

**Murat KIYAK**

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul

\*[kiyak@yildiz.edu.tr](mailto:kiyak@yildiz.edu.tr) ORCID: 0000-0002-9906-8683, Tel: (212) 383 28 01

Geliş: 10.06.2019, Revizyon: 03.02.2010, Kabul Tarihi: 07.02.2020

### Öz

Frezeleme işlemi, imalat sanayinde, oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Frezeleme yöntemi ile parça işlemede, parça yüzey kalitesinin gerektiği ve istenildiği gibi sağlanabilmesi önemlidir. Bu durum, imalat zamanını azaltabileceği gibi, imalat maliyetlerinde de belirgin bir azalma sağlayabilecektir. İşlem esnasında, takım ömrünün de uzun olması, işlemin daha verimli olmasını sağlayacaktır. Hem daha iyi parça yüzey kalitesi hem de daha uzun takım ömrü elde edebilmek için günümüzde silici uçlar tercih edilmektedir. Bu çalışmada, yüzey frezeleme işleminde, standart takım uçları ile silici uçlar karşılaştırılmış ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü ile takım aşınması deneysel olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen literatür araştırması sonucunda, gerek ulusal gerek uluslararası düzeyde, frezeleme işleminde silici uç kullanımı ile yapılmış olan akademik çalışmaların yeterli miktarda bulunmaması, çalışmanın özgün noktası olarak belirtilebilmektedir. İş parçası malzemesi 4140 ıslah çeliği ve kesici takım ucu olarak, Dijet marka XDMW080620-ZTR ve XDMT080708-ZER (silici tip) plaketer kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen takım aşınması ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada, gerek iş parçası yüzey pürüzlülüğü gerek takım aşınması bakımından silici uç kullanımıyla frezeleme uygulamasının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Silici uç; Yüzey frezeleme; Takım aşınması; Yüzey kalitesi;

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI: 10.24012/dumf.574509

## Giriş

Talaş kaldırma işleminin amacı, iş parçalarına sadece şekil vermek değil, geometrik kalite, boyut kalitesi ve yüzey kalitesi bakımından belirli bir doğruluk derecesine göre işlemektir. İşleme kalitesi toleranslara bağlı olarak ifade edilmektedir. Tasarım ve üretim süreci arasında boyut ve yüzey kalitesinde bakımından, beklenen fonksiyonu gerçekleştirilebilmesinin yanı sıra, ekonomik imalat da dikkate alınmalıdır. İşleme kalitesi kapsamında önemli bir unsur; yüzey kalitesidir.

## Yüzey Kalitesi

İşlenen yüzeylerde, makro seviyede olan dalgalar ve mikro seviyede olan yüzey pürüzlülüğü gibi düzensizlikler bulunur. Bu düzensizlikler genel olarak yüzey kalitesini belirler. Parçaların yüzey kalitesi parçanın çalışma kabiliyetini etkiler. Pürüzlülük, parçalar arası temas yüzeyini etkilemekte bununla birlikte, sürtünmeyi ve güç kaybını arttırmakta, aşınmayı hızlandırmakta yani parça fonksiyonunu önemli ölçüde etkilemektedir. Maliyetin artmaması için yüzeyler, gereken kaliteye sahip olmalıdır. Yüzey kalitesi ile ilgili uluslararası (ISO1302/1992) ve ulusal (TS2040/1999) standartlar mevcuttur. Genellikle, yüzey kaliteleri doğrudan imalat yöntemlerine bağlıdır. Yüzey kalitesi, parçanın ilgili yüzeyinin her yerinde aynı olmalıdır. Özellikle bu durum beraber çalışan yüzeylerde daha önemlidir.

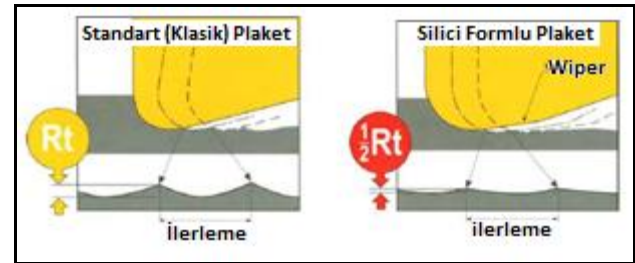
## Kesici Takım Teknolojileri

Kesici takım sektörü, 21. yüzyıla hazırlanan ülkelerin anahtar sektörlerinden biridir. Bu nedenle özellikle sanayileşmiş ülkeler, kesici takım sektörünün gelişmesi için yoğun çaba sarf etmektedir (Avuncan, 1998). Bir başka deyişle günümüzde, kesici takım malzemeleri ve teknolojisi üretkenliğin, kalitenin, yüzey hassasiyetinin artırılmasında aynı zamanda işleme maliyetinin azaltılmasında büyük öneme

sahiptir. Bunun yanında işlenen malzemeye ve işleme yöntemine göre kesici takım seçimi önem arz etmektedir (Mitsubishi, 2018).

## Silici Kesici Takım Teknolojisi

Talaşlı şekillendirme işleminde uygulanmakta olan silici uç (wiper) teknolojisi, normal takım ucundan farklı olarak, Şekil.1'de verildiği gibi takım burun yarıçapının birden fazla olması esasına dayanmaktadır. Bu geometri sayesinde, bu tip kesici takım uçları, daha iyi yüzey kalitesi elde edilmesini sağlar. Literatürde, silici ucun ilk defa 1997 yılında, Sandvik Coromat firması tarafından üretildiği belirtilmektedir (Zeyveli vd. 2011). Silici uçların kesme kenar uzunlukları ve açıları özel olarak tasarlanır, çok uzun olduklarında çok ısı üretirler, kısa olduklarında ise yeterli yüzey kalitesini oluşturamazlar (Schneider, 2017). Silici kesici uçlar, frezeleme işleminde genelde yüzey frezeleme işleminde kullanılır. Genelde freze takımlarında, bir adet silici uç kullanılır (Kesici Takım, 2017). Takım tutucu çapı büyükse devir başına ilerleme, silici ucun kesme kenarından uzun olduğunda iki veya üç kesici takım kullanılmalıdır (Duet, 2017). Silici ucun kesme kenar uzunluğu, genel olarak devir başına ilerlemeden daha fazla olmalıdır. Freze takımlarında genelde silici kesici uçlar, standart kesici uca göre 0.03-0,1mm oranında dışarıya taşacak şekilde ayarlanmaktadır (Duet, 2017, Wang 2015).



Şekil 1. Standart takım ve silici takım ile oluşan yüzey kalitesi (Kesici Takım, 2017)

Liu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (Liu vd. 2008), yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörlerden bahsedilmiş ve standart takım silici

takım karşılaştırması yapılmıştır. Bu parametrelerin en önemlilerinden olan kesici takım geometrisi yani kesici takım burun uç yarıçapı ve ilerleme üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, silici takımın daha iyi yüzey kalitesi oluşturduğu gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri aynı olacak şekilde silici takımda ilerleme iki kata kadar daha fazla verilebilmektedir ve yüzey pürüzlülüğü her iki kesici takımda da ilerleme artınca pürüzlülük değeri artmaktadır. Silici takım ve standart takım üzerine yapılan bir diğer araştırma Correia ve arkadaşı tarafından yapılmış olup (Correia vd. 2011), farklı silici ve standart takım farklı ilerleme hızlarında ve farklı burun uç yarıçapında yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Uç yarıçapı arttığında daha iyi yüzey kalitesi elde edilmektedir. Silici takım kullanıldığında standart takıma göre yaklaşık iki kat daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Silici takım ve standart takımın yüzey pürüzlülüğüne etkisini inceleyen bir başka araştırma Raykar ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (Raykar vd. 2015). Farklı ilerleme, farklı burun uç yarıçapına sahip plaketer ve farklı hızlar için deneyler gerçekleştirilmiştir. Silici takım kullanıldığında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri normal takıma göre daha düşüktür. Silici takım kullanıldığında yüzey kalitesinin iyileştiği açıkça gözükmemektedir (Raykar vd. 2015). Zhang ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmada (Zhang vd. 2017) silici takımın, yüzey kalitesini arttırdığı gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra, talaş kaldırma oranı arttığında her iki takımın kullanımında da yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Silici kesici takım burun yarıçapının yüzey pürüzlülüğüne etkisi ve silici takım ile standart kesici takımın karşılaştırmasını yapan bir diğer çalışma, Zeyveli ve arkadaşı tarafından yapılmıştır (Zeyveli vd. 2011). Çalışmada, farklı uç yarıçaplı silici takımlar ve farklı ilerleme değerlerinde iş parçası yüzey pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Silici uç kullanımında, yüksek ilerlemede dahi, standart uçlu takımla oluşan pürüzlülükten daha düşük değerler elde

etmişlerdir. Bu durum literatürde geçen silici geometrinin yüksek kesme hızı ve yüksek ilerleme değerlerinde iyi sonuç verdiği görüşünü de desteklemektedir. Literatür araştırması sonucunda, tornalama işleminde silici takım kullanıldığında işlenen yüzey kalitesinde iki kata kadar artış görülmektedir, takımın mukavemeti artmakta ve daha yüksek ilerleme değerlerinde çalışabilmektedir. Daha yüksek ilerlemede çalışabilmek, birim zamanda daha fazla talaş kaldırılması anlamına gelir, bu da imalat zamanını kısaltır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan silici tip kesici takım uçları sayesinde bazı işlemlerde, taşlama kalitesinde yüzey elde edebilmektedir.

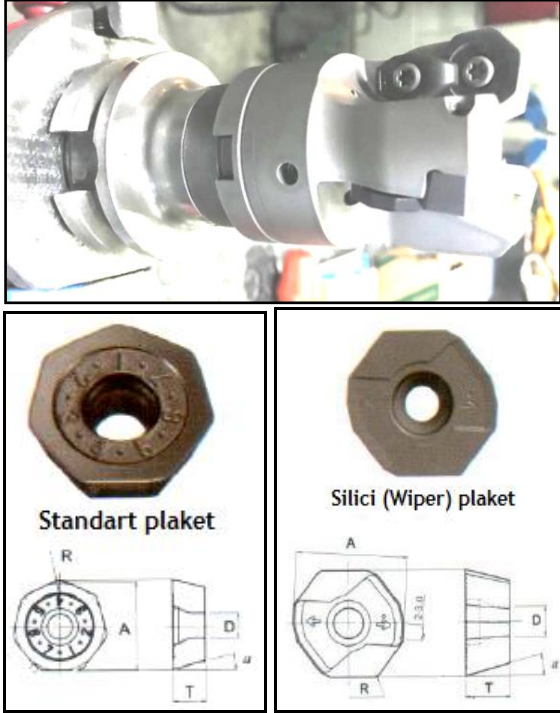
## Frezeleme İşleminde Silici Takım Kullanımı

Tornalama işleminde olduğu gibi, frezeleme işleminde de silici takım kullanılmaktadır. Silici takım genellikle bitirme işlemlerinde kullanılır, yüzey kalitesini artırır, taşlama ihtiyacını ortadan kaldıracaktır. Silici takım aynı zamanda kaba işlemede de kullanılmaktadır. Silici takım kullanılması yüzey kalitesi yanında verimliliği de arttırmaktadır. Fulemevo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Fulemova vd. 2015), silici takımın; takım ömrü ve kesme kuvveti incelenmiştir. Çalışmada, burun yarıçapı büyük olan takımın en iyi yüzeyi verdiği görülmektedir. Bir diğer araştırmada, Salahi ve arkadaşları (Salahi vd. 2010), paslanmaz çelik iş parçasından talaş kaldırırken yüzey kalitesi, takım ömrü ve optimum takım geometrisiyle ilgili deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, kesme hızı arttığında yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, kesme uzunluğunun artması ise yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olduğu ve en iyi yüzeyin dört kesen ağızlı takım ile elde edildiği belirtilmiştir.

## Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, deneyler esnasında, 50mm çapında, üç adet kesici takım plaketer takılabilen freze takımı (Şekil 2) kullanılmıştır. İş parçası olarak, 182mm x 196mm x 165mm boyutlarında

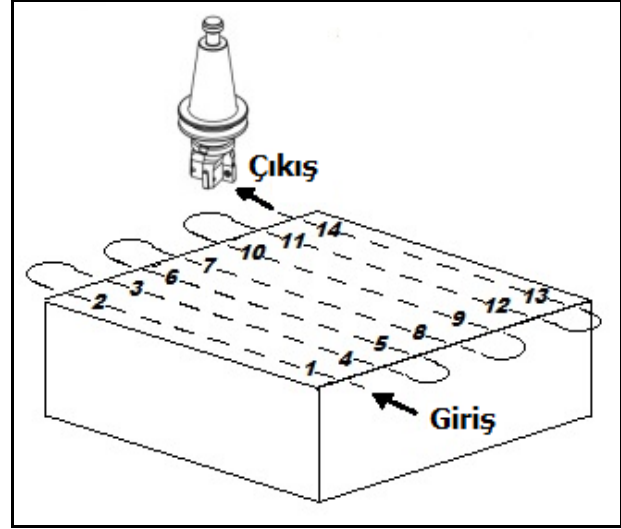
ıslah çeliği(4140) kullanılmıştır. Deneyler, Awea marka BM 850 model CNC freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada Şekil 2’de görülen, Dijet marka kesici uç ve takım kullanılmıştır. Kesici takım tutucu kafa, HEP-3050R-08-22 model olup, plakette XDMT080708ZER standartında silici (wiper) uç ve XDMW086020ZTR tip standart kesici uçlardır.



Şekil 2. Deneyde kullanılan kesici takım kafası ve kesici uçlar

Kesici takımında standart uçlarla yapılan deneyde takıma 3 adet standart uç takılmıştır ve 3mm’lik 2 paso kaldırılmıştır. Ardından parametreler değiştirilmeden uçlar yenilenerek 3 paso ve 5 paso için deney tekrarlanmıştır. Takım tutucu üzerinde bir adet silici ve iki adet standart uç takılarak deneyler tekrarlanmış ve ölçümler yapılmıştır. Üç standart uç kullanılarak yapılan deney S-S-S olarak, bir silici (wiper) iki standart uç kullanılarak yapılan deneyler W-S-S olarak adlandırılmıştır. Deneylerde, tezgah devri 900 dev/dak, kesme derinliği 3mm ve ilerleme 1,3mm/dev olarak alınmıştır. Deneyde, yüzey temizleme işlemi şeklinde çalışma yapılmış olup, Şekil 3’de görüldüğü gibi her paso için

giriş ve çıkışlarda belirlenen toplam on dört noktadan pürüzlülük ölçümü yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümü için Surfest marka SJ-210 model profilometre kullanılmıştır. Deneysel çalışmada ikinci, üçüncü ve beşinci paso sonrasında kesici uçların aşınma ölçümü yapılmıştır.

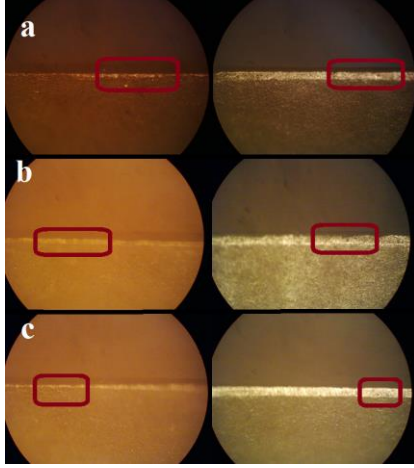


Şekil 3. Yüzey pürüzlülük ölçüm noktaları

Aşınma ölçümü SOIF marka atölye mikroskobu ve 1,0 µm hassasiyetli OSM marka oküler mikrometresi kullanılarak yapılmıştır.

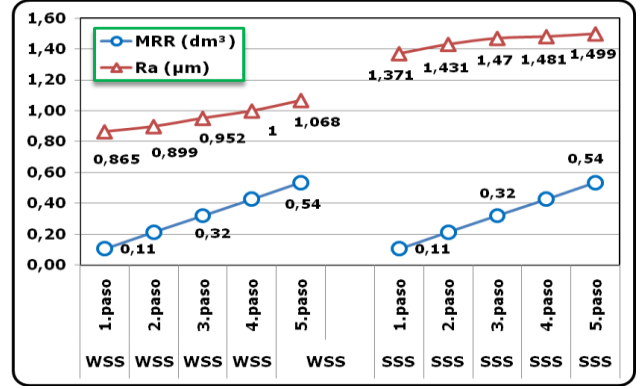
## Deney Sonuçları ve Yorumlar

Yapılan bu deneyde, yüzey frezeleme işleminde, silici ve standart uçların yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiş ve aynı şartlarda takım aşınması değerleri belirlenmiştir. İş parçası üzerinde her seferinde 3mm kesme derinliği verilerek, aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Üçüncü ve beşinci paso sonrasında takım aşınmaları ölçülmüş olup, Şekil 4’de verilmektedir. Şekil 4.’de sol tarafta yer alan görüntüler standart uçların aşınma ölçümlerine ait olup, sağ tarafta bulunan görüntüler ise silici uçların mikroskop görüntüleridir. a-1.paso sonunda oluşan aşınma ölçümü, b-3.paso sonunda oluşan aşınma ölçümü ve c-5.paso sonunda oluşan aşınma ölçümünü göstermektedir. Elde edilen aşınma ölçümleri Çizelge 1’de verilmektedir.



Şekil 4. Takım uçlarının aşınma ölçüm görüntüleri.

Yapılan yüzey pürüzlülük ölçümleri, Şekil 3’de gösterildiği gibi on dört noktadan alınmış olup, ortalama pürüzlülük değeri ve kaldırılan toplam talaş miktarı (MRR) Şekil 5’de verilmektedir. Toledo ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada da (Toledo vd. 2018) silici plaketsli frezeleme işleminde MRR-yüzey pürüzlülüğü arasında benzer bir ilişkinin bulunduğu görülmektedir. Aşınma ölçümleri Çizelge 1’de verilmektedir



Şekil 5. Aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve kaldırılan talaş miktarı

Silici uç kullanılan deneyde elde edilen ortalama aritmetik yüzey pürüzlülük değeri genel olarak, 1.1 µm’den az, standart uçlu takım ile yapılan deneyden elde edilen değerler 1,4µm civarında olduğu görülmektedir. Değerler göz önünde bulundurulduğunda, silici uç kullanıldığında %40 daha iyi yüzey kalitesi elde edildiği görülmektedir. Ehsan ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada da (Ehsan vd. 2019) benzer durum ortaya konulmuştur. S-S-S kullanımı durumunda, W-S-S kullanımına göre yaklaşık %20 daha fazla takım aşınması oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 1. Aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve kesici takım uçlarının aşınma değerleri

Deney türü	Deney no	Yüzey pürüzlülük değeri	Takım aşınması			
			Kesici	Standart	Standart	Standart
W-S-S	1.Deney	0,899 µm	Silici uç	62,4 µm	standart	21,1 µm
	2.Deney	0,952 µm	Silici uç	78,1 µm	standart	23,4 µm
	3.Deney	1,068 µm	Silici uç	87,1 µm	standart	29,3 µm
S-S-S	1.Deney	1,431 µm	standart		standart	30,1 µm
	2.Deney	1,470 µm	standart		standart	31,2 µm
	3.Deney	1,499 µm	standart		standart	35,1 µm

Deneysel çalışmalar, kalıp üreten bir firmada gerçekleştirilmiş olup, silici ve standart uç maliyeti ve firmaya katkı açısından bakıldığında, kesici uçların her birinin firmaya

maliyeti aynı olmuştur. Kullanılan standart ucun yedi kesen yüzeyi bulunurken silici uçta iki kesen kenar bulunmaktadır. Fakat wiper uç kullanıldığında yapılan deneylerde görüldüğü



gibi yüzey kalitesinde %40 kalite artışı gözlemlenmektedir. Bu da, gereken taşlama operasyon zamanını azaltmakta hatta gereksiz kılabilir. Bu sayede firmada, işleme zamanının hatırı sayılır bir oranda azaldığı söylenebilir. Bunun yanı sıra, silici (wiper) uç yanında kullanılan standart uçların diğer uçlara göre %25 daha az aşındığı görülmektedir. Tüm bunlar göz önüne alındığında silici uç kullanımının, firma açısından daha avantajlı olduğu belirtilebilir.

## Sonuçlar ve Tartışma

Silici (wiper) uçlar, tornalama işlemlerinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, frezeleme işlemlerinde çok fazla kullanımına rastlanmaktadır. Benzer şekilde literatürde de tornalama işlemlerinde silici uç kullanımı ile ilgili pek çok yayın mevcutken frezelemede silici uç ile yapılmış olan yayınlar çok daha azdır. Yapılan bu çalışmada, genel olarak kalıp malzemesi olarak kullanılmakta olan 4140 ıslah çeliğinin, silici (wiper) ve standart geometri takımlarla işlenmesi sonucunda oluşan iş parçası yüzey kalitesi ve kesici uçların aşınması araştırılmış ve yapılan deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Silici uçla yapılan deneylerde yüzey kalitesinin, standart uçlarla yapılan deneylere göre daha iyi olduğu görülmektedir. Be bulgu literatür tarafında da (Wang 2015) desteklenmektedir. Silici uçlarda takım burun yarıçapının, daha büyük olması, standart (klasik) uçlara göre daha iyi yüzey kalitesinin elde edilmesini sağlamaktadır.

Silici uçların ve standart uçların aynı takım tutucuda birlikte kullanılmaları ile silici uç bulunmaksızın sadece standart (klasik) uçların kullanılmayan deneylerdeki standart uçların takım ömrü karşılaştırıldığında, silici kullanılan deneydeki standart uçlarda takım ömrünün daha uzun olduğu görülmüştür. Silici ucun burun yarıçapı büyüklüğünden dolayı standart ucun serbest yüzeye sürtünme miktarını doğal olarak azaltması sonucunda bu durum gerçekleşmektedir. Bu

bulgu da ilgili literatür tarafından (Toledo 2018) desteklenmektedir.

Silici uçların burun yarıçaplarının daha büyük olması nedeniyle, iş parçasına daha fazla temas etmesinden dolayı silici kesici uçların takım ömrü daha az olmaktadır.

Silici uç kullanımı, talaşlı imalat sonrasında yüzey kalitesini sağlamak için taşlama gibi operasyonlara olan gereksinimi azaltmaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışmanın talaşlı şekillendirme deneyleri Dünya Kalıp Mak. ve Oto. San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasında gerçekleştirilmiştir. Yazar, firma sahibi Sayın Vahit Ayan'a çalışmaya sağlamış olduğu teknik destek nedeniyle teşekkürlerini sunar.

## Kaynaklar

- Avucan G., 1998, 'Talaş Kaldırma Ekonomisi ve Kesici Takımlar'
- Correia E., Davim P., (2011), "Surface Roughness Measurement in Turning Carbon Steel AISI1045 using Wiper Inserts", *Measurement* 44(5):1000-1005, DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.018
- D'Addona D.M., Raykar S.J., (2016), "Analysis of Surface Roughness in Hard Turning using Wiper Insert Geometry", *Procedia CIRP* 41 (2016) 841
- Dijet Catalogue, (2012), UK, Vol.6
- Ehsan S., Khan S.A., Mughal M.P., Saleem M.Q., Mufti N.A., (2019), "Milling of Ti-6Al-4V alloy using hybrid geometry tooling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.105:s.5045-5059
- Fulemova J., Janda Z., (2015), "Influence of the Cutting Edge Radius and the Cutting Edge Preparation on Tool Life and Cutting Forces at Inserts with Wiper", *Procedia Engineering* 69, 565-573
- Liu Z., Zhang P., Ai X., (2008), "Surface Roughness in High Feed Turning with Wiper Insert", *Key Engineer Material*, Vol 375-376
- "Kesici Takım" Dergisi, (2017), Eylül-Ekim, Sayı:16
- Mitshubishi Material Catalog, Teknik Bilgi Özellikler, Takım Fonksiyonları, İşleme Sorunları ve Çözümleri, C007TR

- Salehi M., Akbari J. and Rezaee R. H., (2010), “Optimization of Tool Life and Surface Quality when High Speed Milling of Stainless Steel 420”, 8th International Conference on High Speed Machining
- Schneider G. “Cutting Tool Application” <http://www.opensourcemachine tools.org/archive-manuals/Cutting-Tool-Applications.pdf>
- Toledo J.V.R., Arruda E.M., Júnior S.S.C., Diniz A.E., Ferreira J.R., (2018), “Performance of Wiper Geometry Carbide Tools in Face Milling of AISI 1045 Steel”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 40:478
- Wang, M., Du S., Xi L., (2015), “Tool Wear Monitoring of Wiper Inserts in Multi-Insert Face Milling Using Three-Dimensional Surface Form Indicators”, Journal of Manufacturing Science and Engineering. October 27, 2014. DOI:10.1115/1.4028924 s.1-36
- Zeyveli M., Karamusaoğlu A., (2011), “Wiper Uç Geometrinin GGG 60 Küresel Grafitli Dökme Demirin İşlenebilirliğine Etkisi”, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma* Vol.29, s.358-366
- Zhang P., Guo Y., (2017), “Machinability for Dry Turning of Laser Cladded Parts with Conventional vs. Wiper Insert”, *Journal of Manufacturing Processes* 28, 494–499

## Investigation of Using Wiper Inserts in the Milling Process

### Extended Abstract

*Machining is one of the major manufacturing technologies and milling is part of this group. It is important that the surface quality of the part is provided as required and desired when machining with the milling method. This objective calls for an optimization not only of each element of the manufacturing system (cutting tools, machine tool, etc.) but also of their use by selecting the milling insert geometry. This may reduce the manufacturing time, as well as a significant reduction in manufacturing costs. If the tool life is long during the process, it will make the process more efficient. Wiper tips are preferred today in order to achieve both better surface quality and longer tool life. Various insert types are available in milling operation and wiper is of them. Research studies based on the application of wiper inserts in milling are limited, but they are stated that the usage of wiper insert improved workpiece surface quality, even grinding could be eliminated.*

*In this study, standard insert and wiper insert were compared in surface milling, and tool wear with workpiece surface roughness was experimentally determined. The results of tool wear and surface roughness obtained from experimental work were compared. In the experiments, XD MT080708 ZER wiper inserts and XDMW086020ZTR types standard inserts were used as cutting tools. Experiments were performed using three standard inserts (S-S-S) and one wiper two standard inserts (W-S-S). Tempered die steel (4140) was used as workpiece. Experimental studies were carried out on Awea BM 850 model CNC milling machine. In the experiments, the revolution speed was selected as 900 rpm and depth of cut was selected as 3 mm. A total of 14 surface roughness measurements were performed at the entrance and exit of each pass. After the second, third and fifth passes, the cutting tool wears were measured. The surface roughness values obtained in the experiments with the wiper insert were generally less than 1.0  $\mu\text{m}$  and the values obtained in the experiments with standard insert were around 1.4  $\mu\text{m}$ .*

*Comparing the surface roughness results, the reduction of 40% was obtained with wiper insert. In the case of using S-S-S, it was seen that approximately 20% more tool wear was occurred as comparing with the usage of W-S-S.*

*In the milling process, the following results were obtained in accordance with surface roughness and tool wear:*

*- It was seen that lower surface roughness values were obtained in the using of wiper inserts than that obtained in the using of standard inserts. In the milling experiments, the surface roughness was reduced by about 40% when the wiper insert was used.*

*- It was observed that tool wear increased by about 20%40% in face milling when the standard inserts (S-S-S) were mounted to the tool holder as comparing with the tool holder mounted a wiper insert. In milling operations, it was observed that the tool life is less due to more contact length of the wiper cutting insert with the workpiece. However, the wiper insert protected the other conventional inserts in the tool holder and caused longer tool life.*

*- The use of a wiper insert in milling operations, especially in die-mold making, reduced the need for operations such as grinding to improve the surface quality after machining.*

*In this study, it has been seen that milling with wiper tip gives better results in terms of tool wear and surface roughness of the workpiece.*

**Keywords:** wiper technology, surface roughness, tool wear.



# Güneş enerjili bir kurutucudaki ekserjetik faktörlerin hesaplanması ve yapay sinir ağı ile modellenmesi

**Mehmet DAŞ \***

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 60250, Tokat  
[mehmet.das@gop.edu.tr](mailto:mehmet.das@gop.edu.tr) ORCID: 0000-0002-4143-9226, Tel: (446) 711 21 00 (38014)

**Ebru KAVAK AKPINAR**

Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23100, Elazığ  
[ebruakpinar@firat.edu.tr](mailto:ebruakpinar@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0003-0666-9189

Geliş: 01.07.2019, Revizyon: 31.07.2019, Kabul Tarihi: 05.09.2019

## Öz

Termodinamik analiz, özellikle ekserji analizi, termal sistemlerin analizi için önemli bir araçtır. Kurutma sistemlerinde ekserji hesaplamaları için birçok formülasyon ve veri kullanılmaktadır. Bugün, büyük miktarda veriyi elle işlemek ve analiz etmek zordur. Bu nedenle, verilen bir problemi çözmek için problem ortamından elde edilen verileri yapay zeka yöntemleri ile eğiterek çözüme ulaşmak hedeflenmektedir. Bu çalışmada, elma ürünü bir güneş enerjili kurutma sisteminde kurutulmuştur ve ürünün kurutma işleminin ekserji analizi yapılmıştır. Bazı ekserjetik faktörlerin elma ürünü kurutmasında kullanılan kurutma sisteminin performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, ekserji etkisi, atık ekserji oranı (AEO), çevresel etki faktörü (ÇEF), ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi (ESI) ve iyileştirme potansiyeli (IP) gibi ekserjetik faktörler dikkate alınmıştır. Ekserjetik bir faktör olan AEO değerlerini tahmin etmek için yapay sinir ağı kullanılarak öngörücü bir model oluşturulmuştur. Modelin geçerliliğini hesaplamak için ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama kare hatası (RMSE), göreceli mutlak hata (RAE) ve kök göreceli mutlak hata (RRAE) hata analizleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, kuruma süresi arttıkça AEO artmıştır. Güneş enerjisi kurutma sisteminin ekserji verimliliği ve gelişme potansiyeli, kuruma süresi arttıkça azalmıştır. YSA kullanılarak oluşturulan öngörücü model, AEO değerlerini başarıyla öngörmüştür. Elde edilen öngörü modelinin farklı kurutma sistemleri ve farklı ürünler için kullanılabileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş kurutma, Ekserjetik faktörler, Atık ekserji oranı, Yapay sinir ağı

\* Yazışmaların yapılacağı yazar:

DOI: 10.24012/dumf.585021

## Giriş

Enerji, ülkelerin gelişmişlik düzeylerini ve sanayinin yanı sıra insanların günlük ihtiyacını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Enerji; kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil kaynaklardan veya güneş, rüzgâr ve su gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilir. Ancak gittikçe daha fazla tükenmekte olan fosil yakıtlar gün geçtikçe daha pahalı hale gelmekte ve yakın gelecekte tükenme durumu ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu yüzden ihtiyaç duyulan enerji gün geçtikçe artacak, ucuz, temiz ve yenilenebilir enerjiye olan ilgi giderek artacaktır (Bilgili vd., 2007)

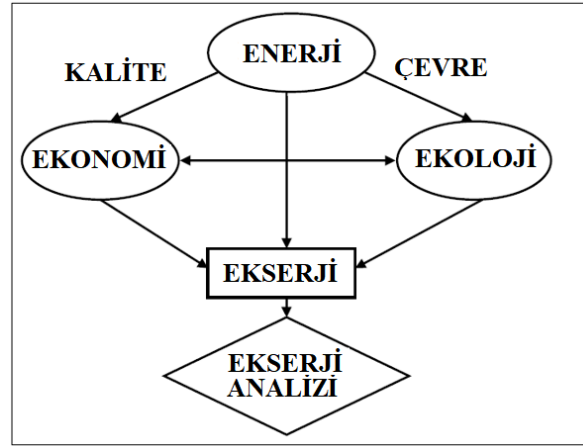
Güneş, insanlık tarihi boyunca mevcut en büyük karbon içermeyen enerji kaynağıdır. Güneş enerjisinin birincil enerji kaynağı olarak nasıl kullanılacağını ve uygulanacağını öğrenmek için birçok araştırma yapılmıştır (Bulut vd., 2017). Genellikle, güneş enerjisi uygulaması iki temel gruba ayrılır. Birincisi, doğrudan güneş enerjisini elektrige dönüştüren fotovoltaik hücreleri kullanarak elektrik üretimi ve diğer ana grup ise güneşle kurutma işleminin dahil olduğu termal uygulama kategorisidir (Mekhilef vd., 2012).

Enerji ve ekserji kriterleri, enerji dönüşüm sistemlerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Enerji ve ekserji, sistemlerin incelenmesinde en temel yöntemlerdir ve termodinamiğin birinci yasasına dayanır (Bilgic ve Yıldız, 2017). Bununla birlikte, enerji analizinde önemli bir yere sahip olan çevresel koşulların ekserji analizlerinde göz önünde bulundurulması ve termodinamiğin ikinci kanununa göre incelenmesi önem teşkil etmektedir. Kütle ve enerji akışının doğasının bir ölçüsü olan ekserji, referans çevresel koşullar altında sistemde elde edilebilecek azami çalışma olarak tanımlanmaktadır (Orhan vd., 2009)

Bir enerji dönüşüm sistemi tasarımında, mühendisler verimliliği artırmak ve çevresel etkileri en aza indirmek için enerji bazlı yöntemler kullanır. Bu yöntemlere ek olarak, termodinamik verimsizlik ve enerjinin çevreye aktarılması gibi faktörler de önemlidir. Termodinamik verimsizlik, ekserjetik analizle belirlenebilir (Morosuk vd., 2013).

Ekserji analizi, çalışılacak enerjinin potansiyelini ve kalitesini ortaya çıkararak, enerjinin erişilemeyen kısmından dolayı enerjinin miktarını, türlerini ve yerini belirlemeyi sağlar. Böylece sistemdeki kayıplar ve sistemin verimliliği ayrıntılı bir şekilde belirlenebilir, düşük verimli çalışma parçaları tespit edilebilir ve geliştirilebilir ve farklı sistemler birbirleriyle karşılaştırılabilir (Song vd., 2002).

Diğer yandan; enerji, ekonomi ve çevre ile ilgili disiplinler arası bir kavram olan ekserji analizi; enerji kullanımı sırasında ekonomi ve çevre üzerindeki etkilerin değerlendirilmesinde etkili bir yöntem haline getirmektedir (Gong, 2001). Bu durum şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir (Rivero vd., 2002).



Şekil 1. Enerji-ekonomi-ekoloji ilişkisinin ekserji analizi açısından değerlendirilmesi

Son zamanlarda, yapay zeka kullanarak enerji ve ekserji analizi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, ekserji kullanımı ve ekserji analizine farklı bir boyut kazandırmaktadır. Herhangi bir sistemin ekserji analizi için tahminli modellemesi, başka bir sisteme örnek olması açısından önemlidir.

Ghritlahre ve Prasad, kaba bir güneş enerjili hava ısıtıcısının performansını ortaya çıkarmak için yapay bir sinir ağı (YSA) modeli kullanılarak sistemin ekserjetik performansını tahmin etmişlerdir. YSA modelinde giriş katmanında deney zamanı, güneş radyasyonu yoğunluğu, pürüzlülük boyutu, atmosferik sıcaklık, ortalama hava sıcaklığı, emici plaka sıcaklığı, giriş

katmanındaki havanın kütle akış hızı ve ekserji girişi, ekserji gibi yedi parametre kullanmışlardır. Çıkış katmanında, ekserji verimliliği, ekserji imhası ve iyileştirme potansiyeli parametrelerini kullanmışlardır. YSA modelinde ortalama kare hata (MSE) değerleri, varyans katsayısı (COV) ve ortalama nispi hata (MRE) hata analizlerini kullanmışlardır. İstatistiksel sonuçlar, kullandıkları YSA modelinin, güneş enerjili hava ısıtıcısının dışsal performansını başarıyla öngördüğünü göstermiştir. (Ghritlahre vd., 2018). Valencia ve diğ. YSA kullanarak kojenerasyon sisteminin mikroturbinli ekserjetik performansını incelemiştir. Geliştirilen bir termodinamik model kullanarak bir geri yayılım sinir ağını eğitmişlerdir. Termodinamiğin ikinci yasasının etkinliğini tahmin etmek ve Matlab kullanarak performans göstergelerini, bir Capstone 30-kW gaz mikroturbini kullanarak bir kojenerasyon sistemini değerlendirmişlerdir (Valencia vd., 2018). Gill ve Singh, bir buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminde R134a'ya alternatif olarak R134a ve LPG soğutucu karışımından oluşan bir soğutucunun ekserjetik analizini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, R134a ve LPG soğutucu akışkan karışımının, R134a'dan daha yüksek performans katsayısı ve ekserji verimlilik değerlerine sahip olduğunu göstermişlerdir. Adaptif nöro-bulanık çıkarım sistemi kullanarak R134a / LPG sisteminin Ekserji verimliliğini tahmin etmişlerdir (Gill ve Singh, 2017). Aghbashlo ve diğ. YSA kullanarak sprey kurutma işleminin ekserjetik performansı tahmin etmişlerdir. Optimal YSA modelini bulmak için çeşitli hata minimizasyon algoritmaları, transfer fonksiyonları ve gizli nöronların sayısının etkinliğini araştırmışlardır. Çıkış parametrelerini (giriş ekserji, çıkış ekserji, kayıp ekserji, tahrip olmuş ekserji, entropi üretimi, ekserji verimliliği ve iyileştirme potansiyeli oranı) ile dört girdi parametresi arasında bir ilişki kurmak için çok katmanlı bir algılayıcı (MLP) YSA kullanmışlardır. Sonuç olarak, elde ettikleri YSA modelinin yüksek ekserji verimliliğine sahip kurutma koşullarını belirlemek için kullanılabileceğini göstermişlerdir (Aghbashlo

vd., 2012). Osuolale ve diğ. atmosferik ve vakumlu damıtma sistemlerinin ekserjetik faktörlerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, termodinamiğin ikinci yasasına göre inceledikleri ham damıtma ünitesinin ekserjetik faktörlerinin modellenmesi ve optimizasyonu için bir ön sinir ağı tabanlı YSA modeli sunmuşlardır (Osuolale vd., 2018).

Bu çalışmada, güneş enerjisi kurutma sisteminde enerji kullanım oranının ve bazı ekserjetik faktörlerin elma kurutma performansına etkisi incelenmiştir. Güneş enerjisi kurutma sisteminin ekserji değerlendirmesi için literatürde dış verimlilik, atık ekserji hızı, çevresel etki faktörü, dış sürdürülebilirlik endeksi ve iyileştirme potansiyeli olarak çeşitli ekserjetik faktörler kullanılmıştır (Midilli ve Küçük, 2015). Ekserjetik bir gösterge olan atık ekserji oranını tahmin etmek için YSA kullanılarak öngörücü bir model oluşturulmuştur. Modelin geçerliliğini hesaplamak için ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama kare hatası (RMSE), göreceli mutlak hata (RAE) ve kök göreceli mutlak hata (RRAE) hata analizleri kullanılmıştır.

## Analizler

### Enerji Analizi

Enerji kullanım oranı (EKO), güneşli havalı kolektörlerinden elde edilen faydalı enerjinin enerji kullanım değerine oranı olarak belirtilmiştir. Güneş enerjili kurutma sisteminin kurutma kabının enerji kullanım oranı Eşitlik 1 ile ifade edilmiştir (Akpınar, 2010).

$$EKO = \frac{\dot{m}_{da} (h_{dci} - h_{dco})}{\dot{m}_{da} c_{pda} (T_{co} - T_{ci})} \quad (1)$$

### Ekserji Analizi

Güneş enerjili kurutma sisteminin ekserji dengesi Eşitlik 2 yardımı ile Eşitlik 3-4-5 ile ifade edilmiştir (Midilli ve Küçük, 2015).

$$\sum \dot{E}x_{in} = \sum \dot{E}x_L + \sum \dot{E}x_d + \sum \dot{E}x_{eus} \quad (2)$$

$$\sum \dot{E}x_d = \sum \dot{E}x_{input,f} + \sum \dot{E}x_{input,sol} - \sum \dot{E}x_{dci} \quad (3)$$

$$\sum \dot{E}x_{in} = \sum \dot{E}x_{input,f} + \sum \dot{E}x_{input,sol} \quad (4)$$

$$\sum \dot{E}x_L = \sum \dot{E}x_{dco} \quad (5)$$

Eşitlik 3 ve 4 de bulunan  $\sum \dot{E}x_{input,f}$  fan tarafından elde edilen ekserjiyi,  $\sum \dot{E}x_{input,sol}$  ise güneş kolektörü tarafından elde edilen ekserjiyi göstermektedir (Midilli ve Küçük, 2015).

Eğer Eşitlik 3-5, Eşitlik 2 de yerine konursa Eşitlik 6 elde edilir.

$$\sum \dot{E}x_{eus} = \sum \dot{E}x_{dci} - \sum \dot{E}x_{dco} \quad (6)$$

Eşitlik 6 da  $\sum \dot{E}x_{dci}$  kurutma kabinine giren ekserjiyi,  $\sum \dot{E}x_{dco}$  ise kurutma kabininde çıkan ekserjiyi ifade etmektedir.

Güneşte kurutma işlemlerinin ekserjetik değerlendirilmesi için çeşitli ekserjetik faktörler kullanılmıştır ve bu ekserjetik faktörlerin tanımları ile özetlenmiş bir listesi Tablo 1'de gösterilmiştir (Midilli ve Küçük, 2015), (Zisopoulos vd., 2017), (Van Gool, 1997).

**Tablo1.** Literatürde bulunan bazı ekserjetik faktörlerin listesi

<i>Adı</i>	<i>Formülü</i>	<i>Eşitlik Numarası</i>
Ekserji verimi	$\eta_{ex} = \sum \dot{E}x_{eus} / \sum \dot{E}x_{in}$	7
AEO	$AEO = (\sum \dot{E}x_d + \sum \dot{E}x_L) / \sum \dot{E}x_{in}$	8
ÇEF	$\text{ÇEF} = AEO \frac{1}{\eta_{ex}}$	9
ESI	$ESI = \frac{1}{\text{ÇEF}}$	10
IP	$IP = (1 - \eta_{ex})(\dot{E}x_{dci} - \dot{E}x_{dco})$	11

## Materyal ve Metot

### Deneyel Kurulum

Kurutma deney seti, esasen, hava ile ısıtılan bir güneş kolektör paneline (1400 mm x 800 mm), bir sirkülasyon fanına ve bir kurutma kabinine sahip olan dolaylı bir zorlamalı konveksiyonlu güneş enerjili kurutucudan oluşmuştur. Havalı güneş kolektör paneli, dış kısmı siyah boya ile boyanmış paslanmaz çelik plakalardan (kalınlığı 0.5 mm) yapılmıştır. Güneş enerjili hava ısıtıcı kolektörü, siyah boya ile boyanmış olan bakır levhayla (kalınlık, 0.4 mm) kaplanmıştır. Cam, ısı kaybını önlemek için hava ısıtıcı üzerinde

şeffaf bir kapak olarak kullanılmıştır. Hava ısıtmalı güneş kolektörü, 23.7° (yerel enlem 38.4°) kolektör açısı altında güneşe doğru yönlendirilmiştir. Hava ısıtmalı güneş kolektörü ayakları bu açıya sabitlenmiştir. Kolektör çerçevesi paslanmaz çelik sacdan yapılmıştır. Kurutucuda elma kurutma işlemi için delikli kurutma tepsisi (90 cm x 40 cm) kullanılmıştır. Deneyel kurulum Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Deneysel Kurulum

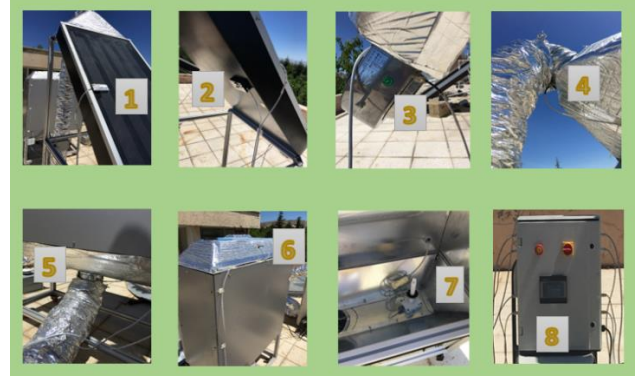
Kurutma kabini alüminyum malzemeden (kalınlık 2 mm) yapılmış ve dikdörtgen boyutlarda (100 cm x 50 cm x 100 cm) tasarlanmıştır. Isıtılmış havayı kolektör paneli ile kurutma dolabı arasına aktarmak için spiral alüminyum tip boru kullanılmıştır. Kolektör paneli ve kabin arasında sıcak hava transferi için kullanılan alüminyum spiral boru bağlantıları sızdırmaz şekilde monte edilmiştir. Kabinlerin alt kısmı, sıcak havayı kolektörden kabine iletmek için davlumbaz olarak üretilmiştir. Kabindeki kuruma havası, kabindeki menfezden dışarıya atılmıştır. Kurutma dolabına üç kurutma tepsisi (90 cm x 40 cm) yerleştirilmiştir. Kurutma kabine bağlı bir sirkülasyon fanı (0,9 m<sup>3</sup> / s, 0,4 kW, 220 V, 50 Hz) ile hava sağlamıştır.

### Deney Prosedürü

Deneylerde kullanılacak elma ürünü kalınlığı 5 mm olacak şekilde oval olarak dilimlenmiştir. Deneyler, 2017 yılı Haziran ayında Elazığ'da gerçekleştirilmiştir. Elazığ, Anadolu'nun doğusundaki 38° 60'N ve 39° 28'in ve 950m deniz seviyesinin üzerinde yer almaktadır. Kurutma deneyi sabah 08.00'de başlamış ve akşam 18.00'a kadar devam etmiştir.

Deneylerde, kolektör giriş sıcaklığı, kolektör çıkış sıcaklığı, kolektör cam sıcaklığı, kolektör taban sıcaklığı, kurutma kabini giriş sıcaklığı, kurutma kabini çıkış sıcaklığı, kurutma kabini sıcaklığı, kurutma kabini nemi, güneş radyasyonu, kurutma kabini hava hızı ve elma ürününün kütle kaybı 30 dakikada periyotlarla ölçülmüştür. Hava ısıtılmalı güneş kolektörlü deney setinin kolektör giriş sıcaklığı, kolektör çıkış sıcaklığı, kolektör cam sıcaklığı, kolektör tabanı, sıcaklık, kurutma dolabı giriş sıcaklığı,

kurutma dolabı çıkış sıcaklığı, kurutma dolabı sıcaklığı ve kurutma dolabı nem ölçüm noktaları Şekil 3'te verilmiştir. Bu ölçüm noktaları için su geçirmez DS18B20 dijital sıcaklık sensörleri kullanılmıştır.



Şekil 3. Ölçüm Noktaları

Şekil 3.'te 1-Panel cam sıcaklığı, 2- panel zemin sıcaklığı, 3- panel giriş sıcaklığı, 4- panel çıkış sıcaklığı, 5- kurutma kabini giriş sıcaklığı, 6- kurutma kabini çıkış sıcaklığı, 7- kurutma kabini sıcaklığı, 7- kurutma kabini nemi ve 8- ölçüm izleme ekranı ile gösterilmiştir.

Elma ürünü sıcaklıklarının ölçülmesinde J tipi demir konstant ısı çiftler, manuel olarak kontrol edilen 20 kanallı otomatik dijital termometre (ELIMKO, 6400) ile  $\pm 0,1$  °C okuma hassasiyeti ile kullanılmıştır. Kurutma kabininin hava hızı 0-15 m/s aralığında çalışan anemometre (LUTRON, AM-4201) ile ve  $\pm 0,1$  m/s okuma hassasiyeti ile ölçülmüştür. Elma ürününde kütle kaybı, 0-3100 g ölçüm aralığında ve 0.001 g hassasiyetinde dijital ağırlık ölçer (BEL, Mark 3100, İtalya) ile ölçülmüştür. Kurutma sisteminin çalışması sırasındaki güneş ışınımı, 0.1 W/m<sup>2</sup> hassasiyetinde Kipp ve Zonen pirometre ve CC12 model dijital güneş entegratörü ile ölçülmüştür. Elmaların ilk ve son nem içeriği, 80 ° C'de Unibloc nem analiz cihazı (Shimadzu MOC63u) ile 0.001 g hassasiyetle belirlenmiştir.

### Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağı (YSA), karmaşık problemleri modellemek için birçok disiplinde yaygın olarak kabul edilen bir bilgisayarlı modelleme aracıdır (Biswas vd., 2017). YSA başlangıçta biyolojik



bir sinir sisteminin performansını modellemek için tasarlanmıştır. Bir YSA'nın iç mimarisi, biyolojik bir beynin bir dizi katmanıya tamamen aynıdır. Birbirine bağlı düğümlerden veya nöronlardan oluşan bir ağ yapısına sahiptir. En yaygın kullanılan YSA mimarisi giriş katmanından, gizli katmanlardan ve çıkış katmanından oluşur. Bu YSA türüne çok katmanlı bir algılayıcı (MLP) denir (Eslamian vd., 2012).

Bu çalışmada, deneylerde elde edilen atık ekserji değerleri için Levenberg-Marquardt (LM)

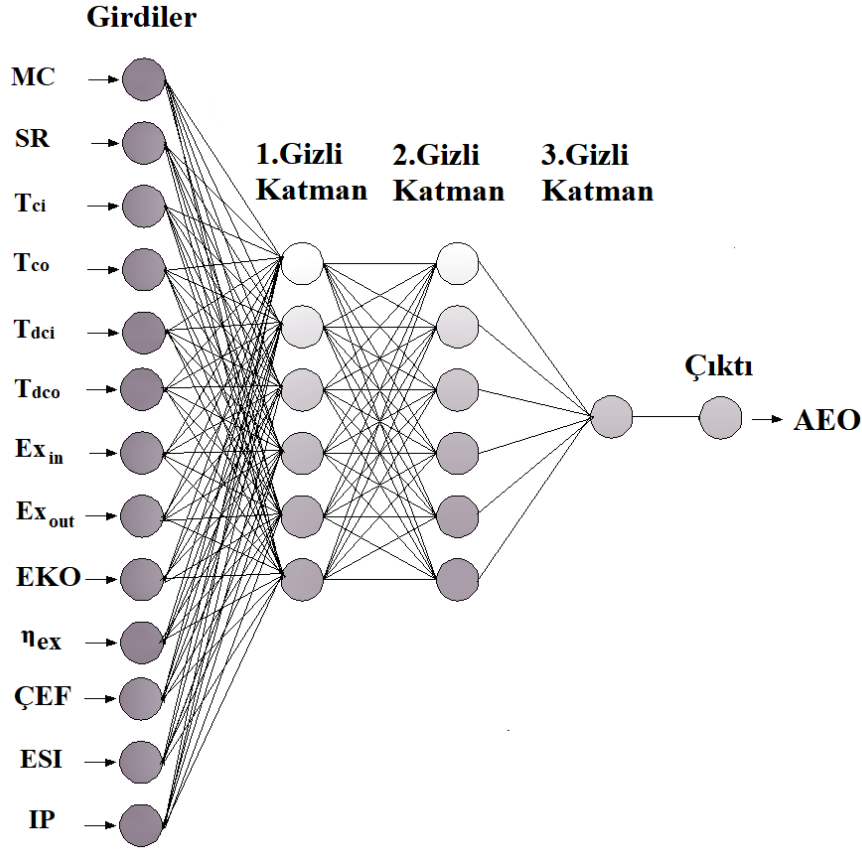
backpropagation öğrenme algoritması, Logsig aktivasyon fonksiyonu ve Backpropagation öğrenme fonksiyonu YSA'da kullanılmıştır. Ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama kare hatası (RMSE), göreceli mutlak hata (RAE) ve kök göreceli mutlak hata (RRAE) hata analizleri, tahmin edilen değerleri model değerlendirmedeki gerçek değerlerle karşılaştırmak için kullanılmıştır. Hata analizinin formülleri ve parametreleri aşağıdaki Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Hata analizleri ve formülleri

Hata Analizi	Formüller	Parametreler
MAE	$\frac{ P_1 - A_1  + \dots +  P_n - A_n }{n}$	P: Tahmin Değeri A: Gerçek Değer n: Toplam Hata Değeri
RMSE	$\sqrt{\frac{(P_1 - A_1)^2 + \dots + (P_n - A_n)^2}{n}}$	P: Tahmin Değeri A: Gerçek Değer n: Toplam Hata Değeri
RAE	$\frac{ P_1 - A_1  + \dots +  P_n - A_n }{ A_1 - A'  + \dots +  A_n - A' }$	P: Tahmin Değeri A: Gerçek Değer A': Gerçek Değer Ortalaması
RRAE	$\sqrt{\frac{(P_1 - A_1)^2 + \dots + (P_n - A_n)^2}{( A_1 - A' )^2 + \dots + ( A_n - A' )^2}}$	P: Tahmin Değeri A: Gerçek Değer A': Gerçek Değer Ortalaması

AEO değerini tahmin etmek için kullanılan ağ 13 girdi verileri ve 1 çıktı verisi olarak modellenmiştir. Ağ için giriş verileri olarak; MC nem içeriği (su/gkuru madde), SR güneş radyasyonu (W/m<sup>2</sup>), T<sub>ci</sub> kollektör giriş sıcaklığı (°C), T<sub>co</sub> kollektör çıkış sıcaklığı (°C), T<sub>dci</sub> kurutma kabininin giriş sıcaklığı (°C), T<sub>dco</sub> kurutma kabin çıkış sıcaklığı (°C), kurutma kabininin EX<sub>g</sub> girişi (kj / kg), Kurutma kabininin EX<sub>c</sub> çıkışı (kj / kg), EKO enerji kullanım oranı, η<sub>ex</sub> ekserji verimi, ÇEF çevresel etki faktörü, ESI

enerji sürdürülebilirlik endeksi ve IP iyileştirme potansiyeli değerleri kullanılmıştır. Çıktı verileri olarak; AEO değerleri kullanılmıştır. YSA da orta katman olarak; altı gizli katman oluşturulmuş ve ara katların sayısı değiştirilerek en iyi çözümler elde edilmeye çalışılmıştır. Üretilen ANN ağ modelinin yapısı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. YSA Ağ Yapısı

Yapay sinir ağları ile AEO değerlerinin tahmini MATLAB 2018b yazılımı kullanılarak yapılmıştır. YSA modelinde toplam 294 veri kullanılmıştır. Eğitim için 200 veri, test için 94 veri kullanılmıştır. Veriler, Ten-Cross doğrulama yöntemine göre YSA da kullanılmıştır. Ten-Cross, bir makine öğrenim modelindeki bir test hatasını tahmin etmek için model seçiminde kullanılan bir tekniktir. YSA yapısı Tablo 4'te gösterilmiştir.

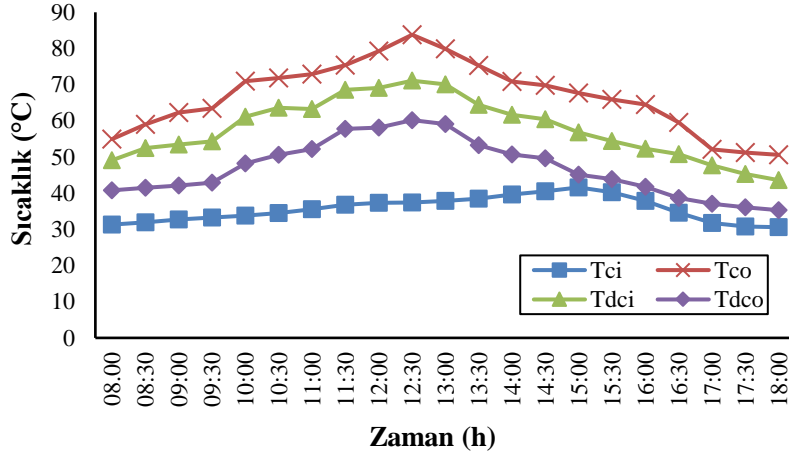
**Tablo 4.** YSA Yapısı ve Parametreleri

Gizli Katman Sayısı	3
Gizli Katmanlardaki Nöron Sayısı	6-6-1
Ağırlık Değerleri	Random
Aktivasyon Fonksiyonu	Logsig
Transfer Fonksiyonu	Tangent Sigmoid Transfer

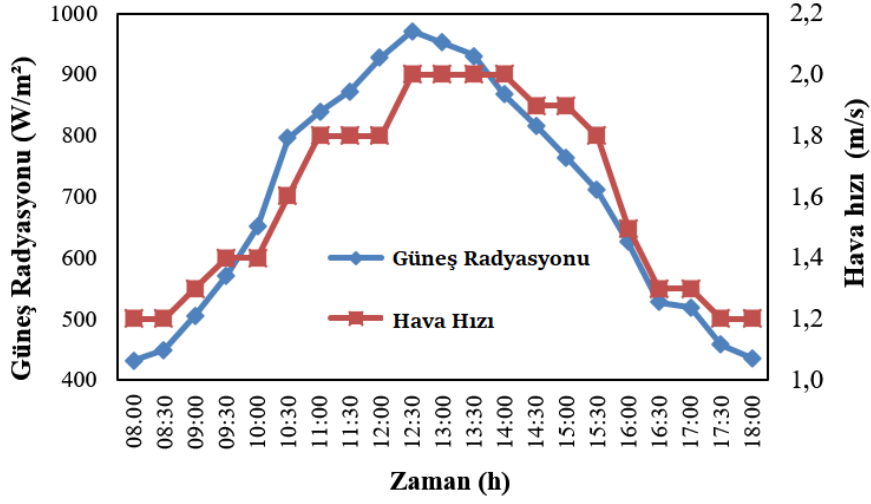
Gizli Katman Sayısı	3
Öğrenme Fonksiyonu	Feed-Forward Backpropagation

## Bulgular ve Tartışma

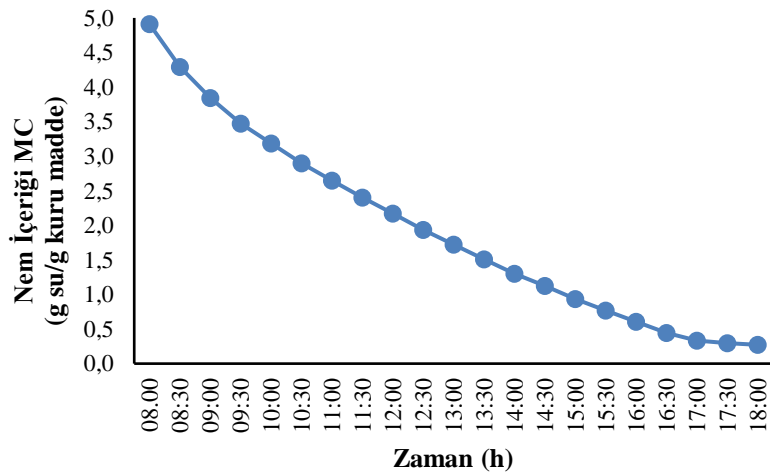
Güneşte kurutma deneyleri sırasında, girişteki hava sıcaklığı ve güneş kolektörünün çıkışı sırasıyla 30.1 - 83.4 °C arasında değişmiştir. Giriş havasındaki kurutma havasının sıcaklığı ve kurutma dolabının çıkışı sırasıyla 71.1 - 35.3 °C arasında değişmiştir (Şekil 5). Güneşli kurutucudaki ve ortam sıcaklığındaki kuruma sıcaklığı kuruma süresi ile sürekli değişmiştir. Doğrudan anlık güneş ışınımı en yüksek değeri 970.3 W/m<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür (Şekil 6). Güneş radyasyonu enerjisi akşam ve sabah saatlerinde minimum değerlerde, öğle saatlerinde maksimum seviyede ölçülmüştür. Kurutma kabinindeki hava hızları, deneysel çalışma günü boyunca 1.2 ms<sup>-1</sup> ile 2.0 ms<sup>-1</sup> arasında değişmiştir (Şekil 6).



Şekil 5. Güneş enerjili kurutma sisteminde sıcaklık değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 6 Güneş radyasyonu ve hava hızı değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 7. MC değerlerinin zamanla değişimi

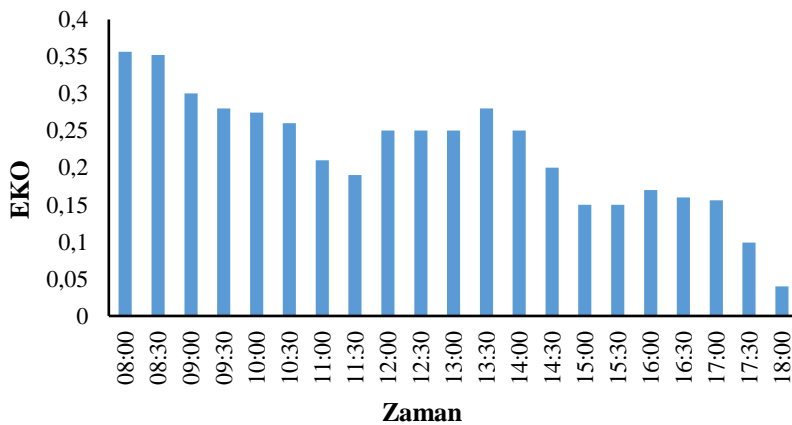
Şekil 7.'ye göre elma ürününün başlangıç nem içeriği değeri  $4.9 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kuru madde}}$  dir. Elma ürünü MC değeri  $0.3 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kuru madde}}$  olana kadar kurutma işlemi devam etmiştir. Bu değerden sonra nem içeriği değişmemiştir. Elma ürünü güneş enerjili kurutucuda 10 saat içerisinde kurutulmuştur.

EKO değeri kurutma işlemlerinde enerji kullanımını analiz etmek için önemli bir parametredir. Aynı zamanda EKO, kurutulmuş ürünlerin yapısına ve nem içeriğine göre değişmektedir. Şekil 8, zamanın bir fonksiyonu olarak EKO'nun değişimini göstermektedir. Güneş enerjili kurutma kabini EKO'nun % 10,25 ile % 46,57 arasında değiştiği görülmüştür. Kurutma deneylerinde EKO değeri sabah saatlerinde (deneyin başında) en yüksek seviyeye ulaşmış ve akşam saatlerinde (deneyin sonunda) minimum değerde kalmıştır. EKO gün boyunca birbirine yakın değerler almıştır, ancak genel olarak düşüş eğilimi göstermiştir.

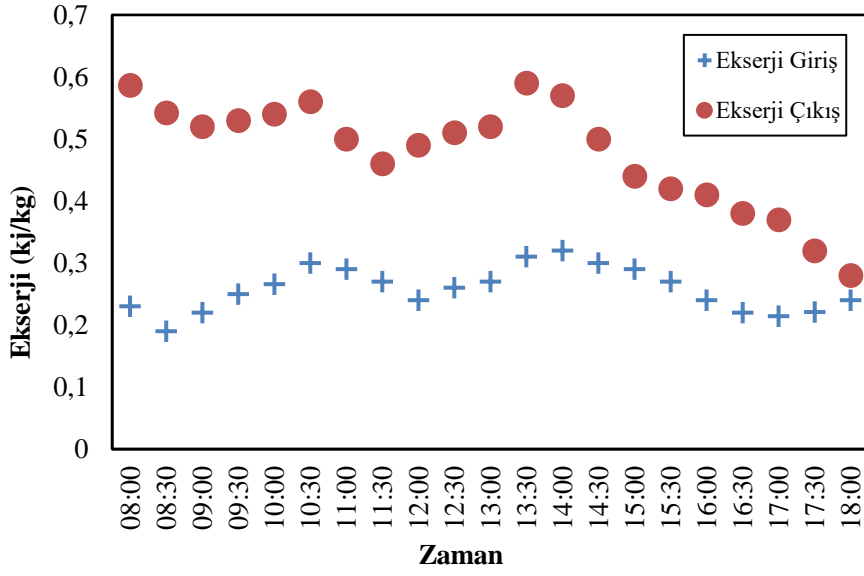
Şekil 9 da kurutma odası ekserji girişinin ve çıkışının kuruma süresindeki değişimini gösterilmiştir. Kurutma odasına giren ve çıkan enerji sırasıyla 0,19 - 0,59 (kJ/kg) arasında değişmiştir. Şekil 9'a göre Ekserji akışı zamanla azalmıştır. Değerler gün içinde azalan bir eğilim göstermiştir.

Ekserji verimliliği ( $\eta_{\text{ex}}$ ), bir güneş kurutma sisteminin sürdürülebilirlik değerlendirmesinde

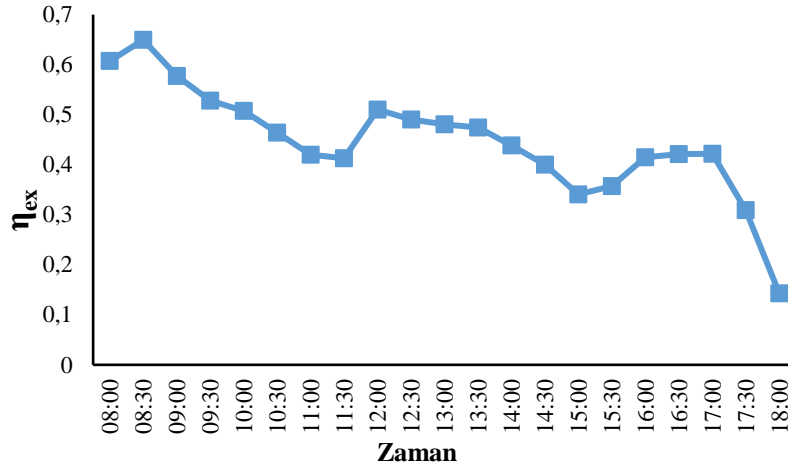
en sık kullanılan göstergelerden biridir. Dışsal girdilerin belirli bir süreç içinde ne kadar iyi kullanıldığını gösterir. Ekserji verimi, temel olarak toplam ekserji girdisine ve kurutma kabini güneş enerjili bir kurutma sistemi için kullanılan toplam enerjiye dayanmaktadır. AEO değeri, güneş kurutma sisteminin atık enerji yönetimi gerekliliğini ifade etmek için önemli bir parametredir [12]. Ekserji performansı ve ekserji sürdürülebilirlik, bir güneş kurutma sisteminin AEO değerinin azalması ile artar. Bir sistemde AEO değeri ne kadar düşükse o kadar iyi verim gösterir. Güneş kurutma sistemi için dış enerji verimliliği ve atık enerji oranı sırasıyla Eşitlik 7 ve Eşitlik 8 kullanılarak hesaplanmıştır. Ekserji verimliliği ve AEO değerlerinin kuruma süresi değişimleri, Şekil 10-12'de gösterilmiştir. Ekserji verimi kurutma süresine göre zamanla azalmıştır. Ekserji verimi, kurutma kabini için %14,09 ile %62,13 arasında değişmiştir. AEO değerleri % 37,86'dan % 85,9'a yükselmiştir. AEO değerleri zamanla artmıştır. Şekil 12'de görüldüğü gibi, değerler azalırken, AEO değerleri artış göstermiştir. Çünkü güneş kurutma sisteminin atık ekserji oranı, havalı güneş kollektörü, kurutma kabini ve fanındaki ekserji kayıplarının bir sonucudur.



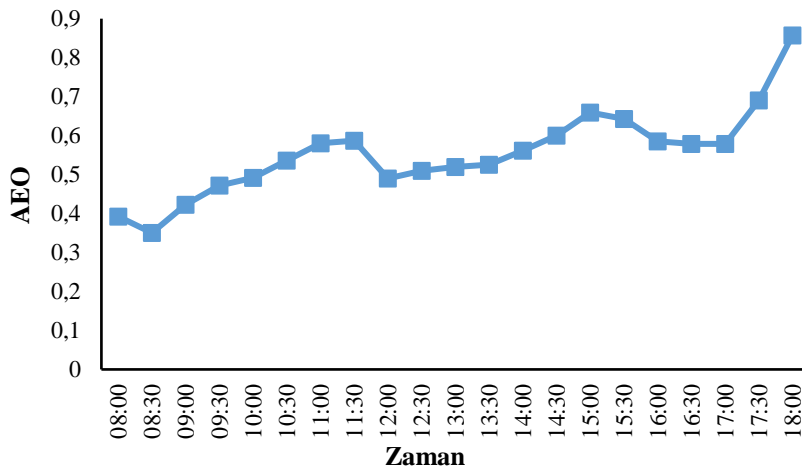
Şekil 8. EKO değerlerinin zamanla değişimi



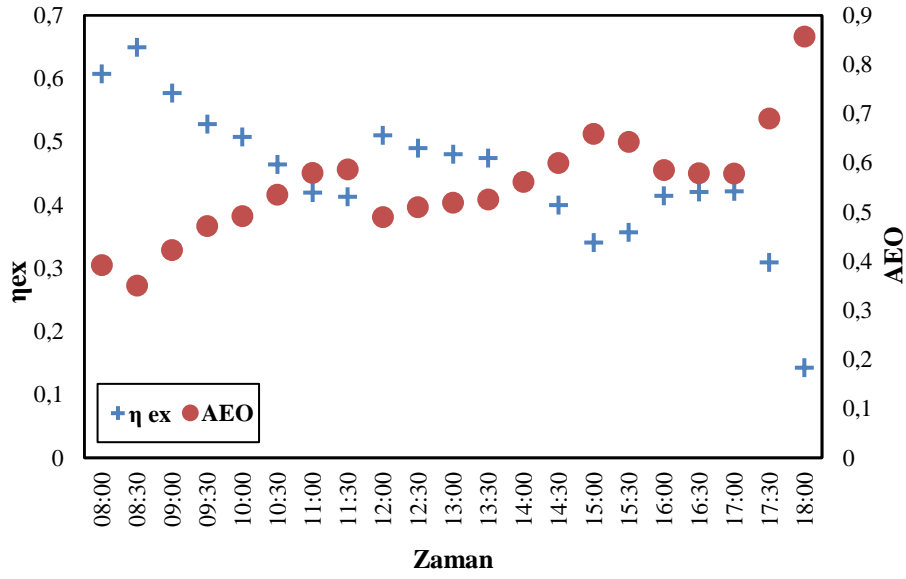
Şekil 9. Ekserji değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 10. Ekserji verim değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 11. AEO değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 12- Ekserji veriminin ve AEO değerlerinin zamanla değişimi

ÇEF değerleri bir güneş kurutma sistemi ve dış enerji sürdürülebilirlik endeksi (ESI) için atık ekserji oranının ve dış enerji verimliliğinin bir fonksiyonu olarak Eşitlik 9-10 ile ifade edilmiştir. Çevresel etki faktörü, atık enerji çıktısı nedeniyle çevrenin zarar görüp görmediğini gösteren önemli bir parametredir (Gong vd., 2001). Ekserjetik sürdürülebilirlik endeksinin ve güneş kuruma sistemi için zamanla çevresel etki faktörünün değişimi sırasıyla Şekil 13 ve 14'te verilmiştir. Şekil 13 ve 14'te gösterildiği gibi, ESI ve ÇEF değerleri kuruma süresi ile önemli ölçüde değişmiştir. Kuruma süresi arttıkça, ESI değerleri azalmış ve ÇEF değerleri artmıştır. Güneş kurutma sistemi için ESI değerlerinin 0,16 ile 1,84 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca, güneş kurutma sistemi için ÇEF değerleri 0,64'den 3,32'ye kadar değişim göstermiştir. ESI ve ÇEF değerlerinin zamanın fonksiyonu olarak değişimi, güneş kurutma sistemi için Şekil 15'te gösterilmiştir. Şekiller 12-15'te gösterildiği gibi, ESI değerleri arttıkça ÇEF değerleri yükselmiştir. Bu durum ESI ve ÇEF değerlerinin ters orantılı olduğunu göstermektedir. Güneş kurutma sisteminde toplam AEO değerleri arttığında, ESI azalmıştır ve bu nedenle ÇEF değerleri artmıştır [12]. Şekil 16, IP değerlerinin zaman içindeki değişimini göstermektedir. IP değerleri 0'dan 0,141 kJ / kg

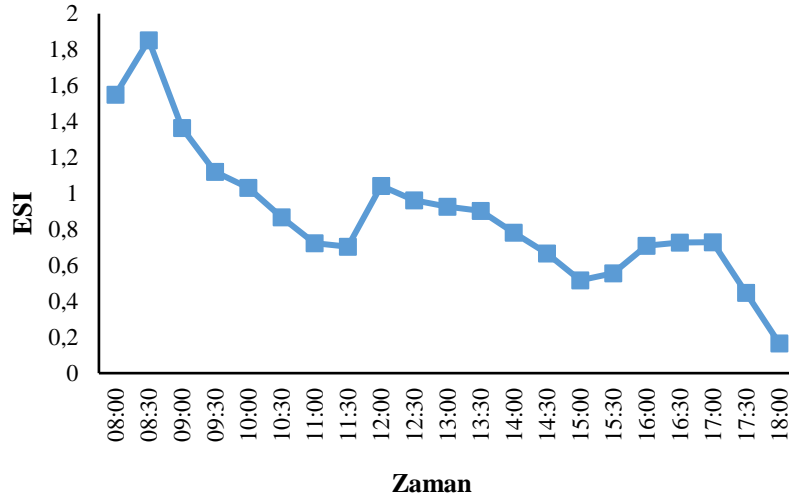
değerleri arasında değişim göstermiştir. IP değerleri kuruma süresinin artmasıyla azalmıştır. Literatürde yapılmış olan kurutma süreçlerindeki IP değerleri incelemelerinde Fudholi vd. (2013), güneş kollektörü ortalama IP değerini 0.085 kJ olarak hesaplamışlardır. Fudholi vd. (2015), çalışmalarında hurma yaprağı kurutmuşlar ve kurutma sisteminin ortalama IP değerini 0.017 kJ/kg olarak bulmuşlardır. İbrahim vd. (2013), güneş kollektörünün ortalama IP değerini 0.02 kJ olarak bulmuşlardır. AEO değerlerini tahmin etmek için MATLAB programında YSA yöntemi kullanılmıştır. Yapay sinir ağı kullanılarak MATLAB' tan elde edilen modelin ortalama karesel hata (MSE) hata analizi ve eğitimler, validasyon ve test setleriyle ilgili hata performansları Şekil 17'de gösterilmiştir. Şekil 17. Eğitimin sonucu, her bir yinelemedeki eğitim, doğrulama ve test setleri için hata değerlerindeki değişimi göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi, ağı eğitimi 1000 yineleme ile optimum sonuca ulaşmıştır. MATLAB'daki eğitimler, validasyon ve test setleri için regresyon grafiği Şekil 18'de gösterilmektedir. Şekil 18'deki grafiğe göre en düşük değer doğrulama setine ait 0,92192'dir. Tahmini model, deneysel verilerden elde edilen AEO değerleri için YSA kullanılarak elde edilmiştir. Tahmini model tarafından elde edilen AEO

değerleri, Şekil 19'da gösterilmiştir. Şekil 19'a göre, öngörücü ve deneysel AEO değerleri birbirine çok yakındır. En iyi tahmin 7, 13 ve 17 değerlerinde gerçekleşmiştir. En kötü tahmin 2 ve 21 değerlerinde gerçekleşmiştir. YSA ile elde

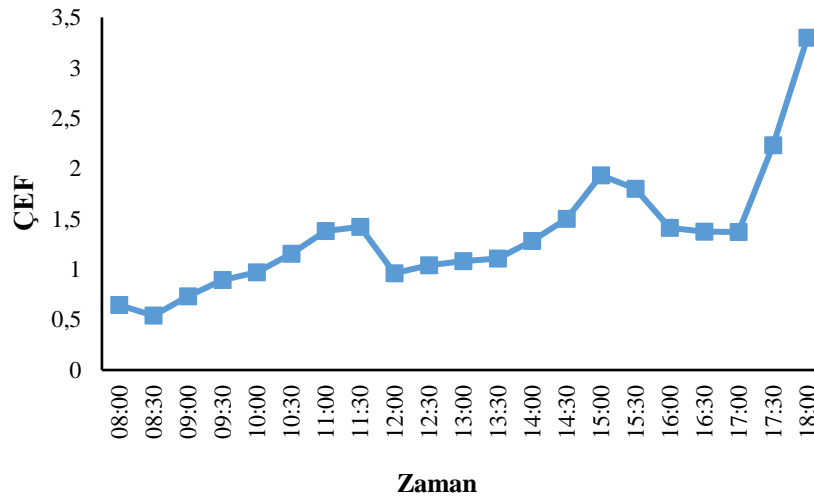
edilen modelin hata analizi sonuçları Tablo 5'de verilmiştir. Tablo 5'teki hata oranları 1'den düşüktür ve YSA başarılı bir şekilde tahminsel modeli oluşturmuştur.

**Tablo 5.** YSA Hata Analiz Sonuçları

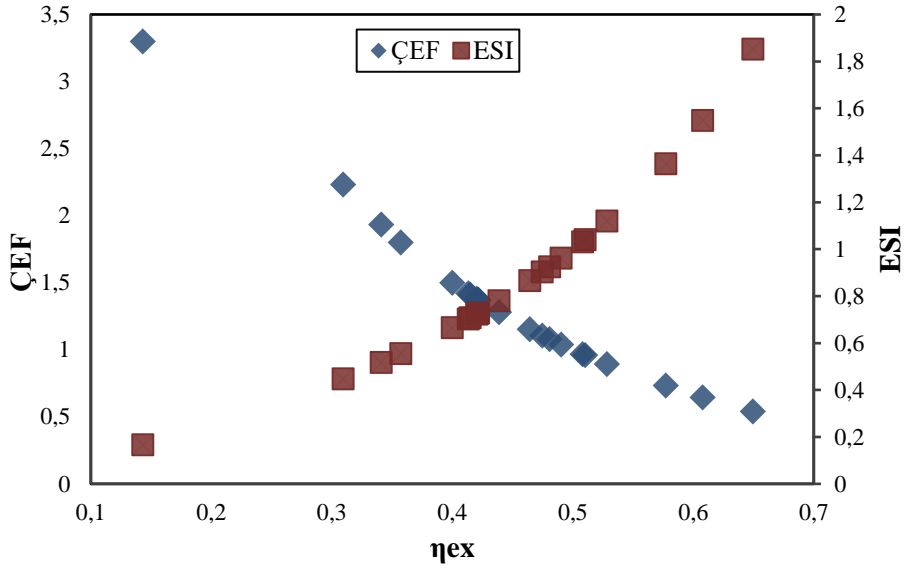
Hata Analizi	Analiz Sonucu
MAE	0.068
RMSE	0,016
RAE	12.3 %
RRAE	14.1 %



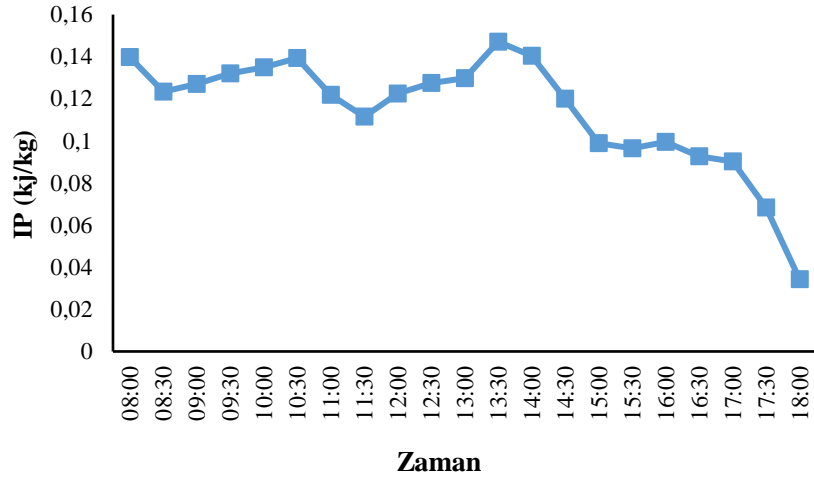
*Şekil 13- ESI değerlerinin zamanla değişimi*



Şekil 14- ÇEF değerlerinin zamanla değişimi



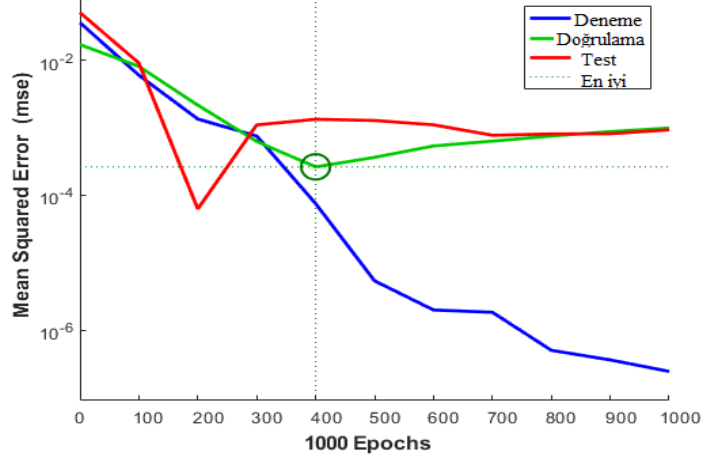
Şekil 15- ÇEF ve ESI değerlerinin ekserji verim değerlerine göre değişimi



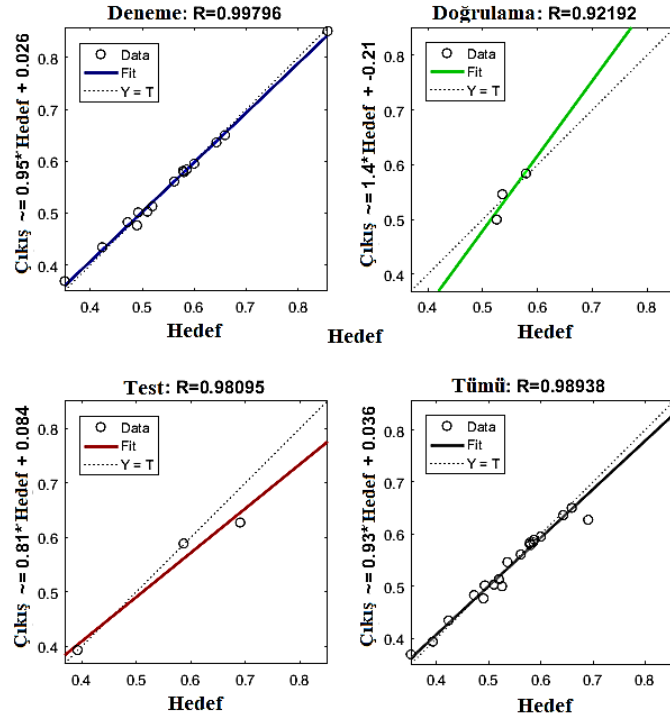
Şekil 16- IP değerlerinin zamanla değişimi



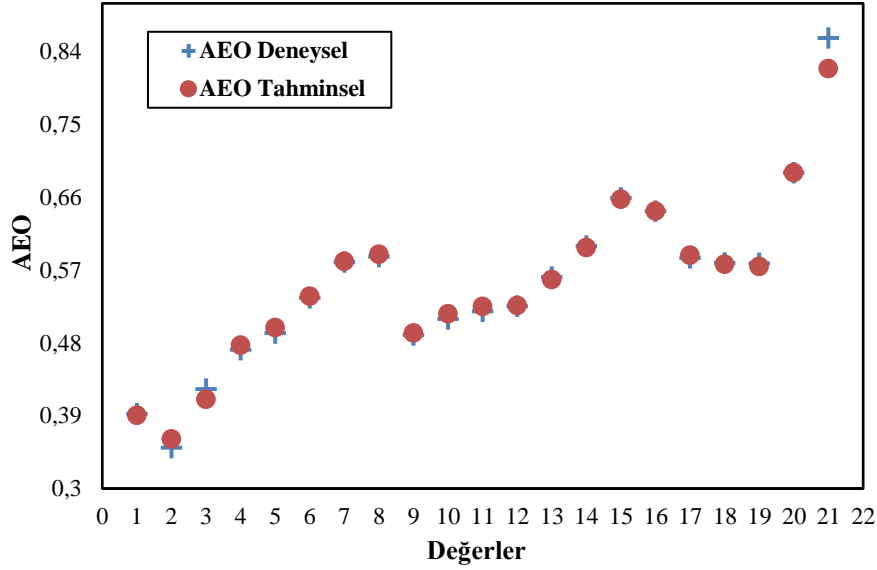
**400. Epoch'ta En iyi Tahmin Performans Değeri 0.0002628**



Şekil 17- Eğitim, doğrulama ve test setleri ile ilgili hata performansları



Şekil 18- MATLAB'da eğitim, doğrulama ve test setleri için regresyon grafiği



Şekil 19- AEO'nun Deneysel ve Öngörülen Değerleri

## Sonuçlar

Güneş enerjili gıda kurutucuda elma ürünü 10 saat içinde 51.2 ve 83.8 °C kurutma havası sıcaklıklarında başarıyla kurutulmuştur. Güneş kurutma işleminin ekserji analizleri yapılmıştır. Enerji kullanım oranının ve bazı ekserjetik göstergelerin, güneş kurutma sistemindeki elma ürününün kurutma performansına etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, EKO ve ekserji verimliliğinin güneş kurutma sistemi için sırasıyla% 10.2 - 46.7 ve% 14.09 -% 62.13 arasında değiştiğini göstermiştir. Atık ekserji oranı değerleri% 37,86'dan% 85,9'a değişmiştir. Güneş enerjili kurutma sistemi için ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0.164 ile 1.641 arasında değişmiştir. Güneş enerjisi kurutma sistemi için çevresel etki faktörü değerleri 0.830'dan 6.096'ya değişim göstermiştir. İyileştirme potansiyeli 0 ile 0,141 kJ / kg arasında değişmiştir.

Sonuç olarak, güneş kurutucusundaki ekserjetik faktörler belirlenmiş ve hesaplanmıştır. Atık ekserji oranı için YSA kullanılarak öngörücü bir model elde edilmiştir. Modelin geçerliliğini belirlemek için hata analizleri yapılmıştır. Tablo 5'teki hata analizleri sonucunda, YSA'nın başarılı bir tahmin yaptığı söylenebilir. Şekil 19'daki deneysel ve öngörücü değerlerin farklı olması, YSA'da kullanılan öngörücü modelin hata oranlarına bağlıdır. Bundan başka; daha uzun

kuruma süresine sahip ürünler kullanılarak daha fazla veri elde edilebilir ve farklı hesaplamalı zekâ yöntemleri kullanılarak daha başarılı bir tahmine dayalı model elde edilebilir.

## Teşekkür

Bu çalışma 2017 MF-16.34 proje numarası altında, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje birimi (FUBAP) tarafından desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., Madadlou, A. (2012). The use of artificial neural network to predict exergetic performance of spray drying process: A preliminary study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 88, 32-43.
- Akpınar E.K., (2010). Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: modelling, performance analyses. *Energy Convers Manag* 51:2407-2418.
- Bilgiç, Y., Yıldız, C., (2017). Güneş enerjili bir damıtıcıda emici yüzey alanının ekserji verimi üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 8(1), 191-202.
- Bilgili, M., Sahin, B. ve Yasar, A., (2007). Application of Artificial Neural Networks for the Wind Speed Prediction of Target Station Using Reference Stations Data, *Renewable Energy* 32, 2350-2360.

- Biswas, S., Chandra, S., Ghosh, I., (2017). Estimation of Vehicular Speed and Passenger Car Equivalent Under Mixed Traffic Condition Using Artificial Neural Network. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(9), 4099-4110.
- Bulut, H., Boloğur, H., Beyazıt, N. İ., Demirtaş, Y. and İşiker, Y., (2017). Design and Experimental Analysis of A Solar Hybrid Type Drying System, *International Advanced Researches & Engineering Congress, Osmaniye*, 16-18 Kasım, s.1-9.
- Eslamian, S. S., Gohari, S. A., Zareian, M. J., Firoozfar, A., (2012). Estimating Penman–Monteith reference evapotranspiration using artificial neural networks and genetic algorithm: a case study. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37(4), 935-944.
- Fudholi, A., Sopian, K., Alghoul, M. A., Ruslan, M. H., Othman, M.Y., (2015). Performances and improvement potential of solar drying system for palm oil fronds. *Renewable Energy*, 78, 561-565.
- Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M. Y., Ruslan, M. H., Bakhtyar, B., (2013). Energy analysis and improvement potential of finned double-pass solar collector. *Energy Conversion and Management*, 75, 234-240.
- Ghritlahre, H. K., Prasad, R. K., (2018). Exergetic Performance Prediction of a Roughened Solar Air Heater Using Artificial Neural Network. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 64(3).
- Gill, J., Singh, J., (2017). Energetic and exergetic performance analysis of the vapor compression refrigeration system using adaptive neuro-fuzzy inference system approach. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, 246-260.
- Gong, M. ve Wall, G., (2001). On Exergy and Sustainable Development-Part 2: Indicators and Methods, *International Journal of Exergy*, 1, 4, 217-231.
- Ibrahim, A., Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M.Y., Ruslan, M. H., (2014). Efficiencies and improvement potential of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) system. *Energy Conversion and Management*, 77, 527-534.
- Mekhilef, S., Safari, A., Mustaffa, WES., Saidur, R., Omar R. and Younis MAA., (2012). Solar energy in Malaysia: current state and prospects, *Renew Sustain Energy Rev.*, 16(1):386–96.
- Midilli A, Kucuk H., (2015). Assessment of exergetic sustainability indicators for a single layer solar drying system. *Int J Exergy* 16(3):278–292.
- Morosuk, T., Tsatsaronis, G., Schult, M., (2013). Conventional and advanced exergetic analyses: theory and application. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(2), 395-404.
- Orhan, M. F., Dincer, I., Rosen, M. A., (2009). Energy and exergy analyses of the drying step of a copper-chlorine thermochemical cycle for hydrogen production. *International Journal of Exergy*, 6(6), 793-808.
- Osuolale, F. N., Zhang, J., (2018). Exergetic Optimisation of Atmospheric and Vacuum Distillation System Based on Bootstrap Aggregated Neural Network Models. In *Exergy for A Better Environment and Improved Sustainability 1* (pp. 1033-1046). Springer, Cham.
- Rivero, R., (2002). Application of the Exergy Concept in the Petroleum Refining and Petrochemical Industry, *Energy Conversion and Management*, 43, 1199-1220.
- Song, T. W., Sohn, J. L., Kim, J. H., Kim, T. S. ve Ro, S. T., (2002). Exergy-Based Performance Analysis of the Heavy-Duty Gas Turbine in Part-Load Operating Conditions, *International Journal of Exergy*, 2, 105-112.
- Valencia, G. E., Restrepo, J. B., Osorio, M., (2018). Exergetic Modelling of a 30-kW Gas Microturbine and Cogeneration System by Artificial Neural Networks. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 1873-1878.
- Van Gool, W., (1997). Energy Policy: Fairly Tales and Facts. In *Innovation and Technology*.
- Zisopoulos, F.K., Rossier-Miranda F.J., Goot A.J.V.D, Boom R.M., (2017). The use of exergetic indicators in the food industry – A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 57(1):197-211.

## Calculation of some exergetic indicators in a solar dryer and modeling with artificial neural network

### Extended abstract

Thermodynamic analysis, especially exergy analysis, is an important tool for analysis of thermal systems. Many formulations and data are used for exergy calculations in drying systems. Today, it is difficult to process and analyze a large amount of data manually. Therefore, in order to solve a given problem, it is aimed to reach the solution by educating the data obtained from the problem environment with artificial intelligence methods. In this study, apple product was dried in a solar drying system and exergy analysis of the drying process of the product was carried out. The effects of some exergetic indicators on the performance of drying system used in apple product drying were investigated. For this purpose, exergetic indicators such as exergy effect, waste exergy ratio, environmental impact factor, external sustainability index and improvement potential have been taken into consideration. A predictive model was constructed using the artificial neural network to estimate the waste exergy rate, which is an exergetic indicator. Mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), relative absolute error (RAE) and root relative absolute error (RRAE) error analyzes were used to calculate the validity of the model. As a result, the waste exergy ratio increased as the drying time increased. Exergy efficiency and improvement potential of solar drying system decreased with increasing drying time. The predictive model created using ANN has successfully predicted the rate of waste exergy ratio. It has been shown that the resulting predictive model can be used for different drying systems and different products. The aim of this study is to state the importance of using exergetic indicators with food drying systems. It also shows that artificial intelligence methods can be used with exergy and exergetic indicators. The aim of this study is to state the importance of using exergetic indicators with food drying systems. It also shows that artificial intelligence methods can be used with exergy and exergetic indicators (Table 1).

Table 1. ANN Error rates

Error Analyze	Error Rate
MAE	0.088
RMSE	0,016
RAE	12.3 %
RRAE	14.1 %

Figure 1 shows the experimental WER values and the WER values estimated by the model generated by ANN. According to Figure 1, the experimental and predictive WER values are very similar to each other.

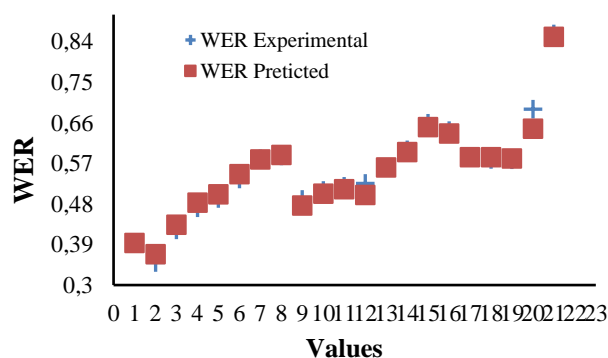


Figure 1. Experimental and Predicted WER values

**Keywords:** Solar drying, Exergetic indicators, Waste exergy ratio, Artificial neural network



## Zeminle temas eden yapı kabuğunun ısı yalıtım kalınlığı için bir model önerisi

**İsmail Ağa GÖNÜL\***

Dicle Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Diyarbakır  
[ismail@dicle.edu.tr](mailto:ismail@dicle.edu.tr) ORCID: 0000-0002-9833-7140, Tel: (412) 241 10 00 (3720)

**Hatice ÇİÇEK**

Dicle Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Diyarbakır  
[hctgnl@gmail.com](mailto:hctgnl@gmail.com) ORCID: 0000-0003-3271-1854, Tel: (412) 241 10 00 (3716)

Geliş: 09.09.2019, Revizyon:16.10.2019, Kabul Tarihi: 23.10.2019

### Öz

*Bu çalışmada, zeminle temas eden yapı kabuğu için ekonomik yarar açısından en uygun ısı yalıtım kalınlık seçeneğinin belirlenmesinde kullanılacak ve (1) zeminle temas eden yapı kabuğunun tüm geometrik özellikleri için hesap olanağı sunabilen esneklikte olacak, (2) zeminle temas eden yapı kabuğu için, sadece ürün standardizasyonu açısından kabul edilebilirliği olan ısı yalıtım kalınlık seçenekleri içinden ekonomik yarar açısından en uygununun seçilebilmesine olanak tanıyacak, (3) pratik olarak kullanılabilmesini sağlayacak kadar kısa sürede, doğru ve güvenilir sonuç verecek bir optimizasyon modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır.*

*Bu amaçla, öncelikle geliştirilecek optimizasyon modelinde kullanılacak ne tür ısı yalıtım kalınlık seçenekleri, optimizasyon prosedürleri ve hesaplama yöntemleri (toplam ısıtma maliyeti ile yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen toplam ısı transferini hesaplamak için) bulunduğu araştırılmış, daha sonra, bunlardan amaçlanan özelliklere sahip olanları belirlenerek yeni bir optimizasyon modeli için bir araya getirilmiştir.*

*Geliştirilen optimizasyon modeli, hem bodrum katlı hem de bodrum katı olmayan yapıların zeminle temas eden kabuğunun tüm geometrik özellikleri için hesap olanağı sunmaktadır. Optimizasyon modelinin kullanılması ile elde edilecek ısı yalıtım kalınlıkları (0.01 m aralıklı 0.01-0.20 m arası kalınlıklar), piyasada bulunan veya üretimi standardizasyon açısından kabul edilebilir kalınlıklardır. Bu özellik, daha önce geliştirilen hiçbir optimizasyon modelinde bulunmamaktadır. Doğrulaması (validation) yapılmış hesaplama yöntemleri olan optimizasyon modelinden geliştirilen bilgisayar programı versiyonu sayesinde pratik olarak kullanılabilmesini sağlayacak kadar kısa sürede sonuç alınabilmektedir.*

**Anahtar Kelimeler:** zemin; yapı kabuğu; ısı yalıtım kalınlığı; optimizasyon modeli; ekonomik analiz;

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Yapılar için kullanılan enerjinin önemli bir bölümü yapıların ısıtılmasında kullanılmaktadır. Yapılarda kullanılan ısıtma enerjisini azaltma yollarından biri de yapı kabuğunda kullanılacak ısı yalıtım kalınlığını arttırmaktır. Ancak, yüklenici ve yapı kullanıcıları ısı yalıtımını da bir yatırım olarak değerlendirdikleri için bu kalınlığın ekonomik yarar açısından da uygun olması gerekmektedir.

Bu durumda, yapı kabuğunda kullanılacak ısı yalıtım kalınlığının, yapının toplam ısıtma maliyeti (toplam yakıt maliyeti + toplam ısı yalıtım maliyeti) ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Şöyle ki, yapı kabuğunda kullanılacak ısı yalıtım kalınlığı arttıkça, iç ortamda belli bir iç sıcaklığı sağlamak için ısıtma sistemi tarafından iç ortama verilmesi gereken ısı enerjisi düşeceği için “toplam yakıt maliyeti” de düşecektir. Ancak, yapı kabuğunda kullanılacak ısı yalıtım kalınlığı arttığı için bu kez “toplam ısı yalıtım maliyeti” artacaktır. Bu nedenle, değişen koşullara göre yapının toplam ısıtma maliyetinin en düşük olmasını sağlayacak belirli bir ısı yalıtım kalınlığı bulunmaktadır. Yapı kabuğunda bu kalınlıktan daha az veya daha fazla ısı yalıtım kullanılması ekonomik yarar açısından uygun olmayacaktır. Ekonomik yarar açısından en uygun olacak bu ısı yalıtım kalınlığı ise ancak bir optimizasyon modeli ile belirlenebilmektedir.

Yapı kabuğunda kullanılacak ısı yalıtım kalınlığının ekonomik yarar ile ilişkilendirildiği birçok çalışma yapılmıştır (Açıkkalp ve Kandemir, 2019; Al-Sanea, 2005; Bolattürk, 2006; Çomaklı ve Yüksel, 2003; Dylewski ve Adamczyk, 2011; Evin ve Ucar, 2019; Gönül, 2008; Jie vd., 2018; Kalema, 2001; Kaynaklı, 2012; Nematchoua, 2017; Sevindir vd., 2017; Simona vd., 2017). Bunların çoğu, hava ile temas eden yapı kabuğu için ekonomik yarar açısından en uygun ısı yalıtım kalınlık seçeneğinin belirlenmesi amacı ile yapılmıştır. Oysaki özellikle il merkezlerinde arsa fiyatlarının yüksek olması, arsadan daha fazla yararlanmayı zorunlu kılmakta, bunun sonucu yapılar daha yükseklere tırmanırken yeraltına

doğru gelişme eğilimi de artmaktadır. Günümüzde insanların sürekli buldukları çarşı, sinema gibi mekânların zemin yüzeyi altındaki yapı kesiminde yer aldığı sık görülmektedir. Zeminle temas eden ısıtılan mekân sayısı ise sürekli artmaktadır. Bu tür mekânların zeminle temas eden kabuğu için de ekonomik yarar açısından en uygun ısı yalıtım kalınlık seçeneğinin belirlenmesi gerekmektedir.

Zeminle temas eden yapı kabuğu için ekonomik yarar açısından en uygun ısı yalıtım kalınlık seçeneğini etkileyen değişkenler ise şu ana başlıklar altında sınıflandırılabilir:

- Yapının zeminle temas eden kabuğunun geometrik özellikleri,
- Yapının bulunduğu yerin iklimsel koşulları,
- Yapıda kullanılacak yakıt ile ilgili özellikler,
- Yapının temas ettiği zeminin ısı özellikleri,
- Yapının zeminle temas eden kabuk bileşenlerinin ısı özellikleri ve
- Yapıda kullanılacak ısı yalıtımının birim maliyeti

Değişken sayısının çokluğu, zeminle temas eden yapı kabuğu için ekonomik yarar açısından en uygun ısı yalıtım kalınlık seçeneğinin belirlenebilmesi amacı ile kullanılacak optimizasyon modellerinin daha kompleks bir yapıda olmalarını gerektirmektedir. Bu amaçla geliştirilen optimizasyon modellerinin (Oak Ridge National Laboratory, 2002; Carmody vd., 1999) ise şu olumsuz özellikleri olduğu tespit edilmiştir: (1) İncelenen modeller, sadece belirli sayıda zeminle temas eden yapı kabuğu geometrisi konfigürasyonu için kullanılacak modellerdir. (2) İncelenen modellerin hiçbirisi, ürün standardizasyonu açısından kabul edilebilirliği olan ısı yalıtım kalınlıklarını dikkate almamaktadır. Bu nedenle, bu modellerin kullanılması ile elde edilecek ısı yalıtım kalınlıkları, sektörde hiçbir üretici firma tarafından üretilmeyen veya üretilmesi standardizasyon açısından uygun olmayan kalınlıklar olabilecektir. (3) İncelenen modellerde kullanılan optimizasyon prosedürleri olası tüm ısı yalıtım kalınlık seçeneklerini dikkate almadıklarından, optimum ısı yalıtım

kalınlık seçeneği belirlenememektedir. İncelenen bu modellerde kullanılan hesaplama yöntemleri ile bu modellerin pratik olarak kullanılabilmesini sağlayacak kadar kısa sürede sonuç alınabilmektedir. Ancak, yapının temas ettiği zeminin ısı özellikleri ile yapının zeminle temas eden kabuk bileşenlerinin ısı özellikleri kapsamındaki değişkenleri hesaplama yöntemlerinde doğru bir şekilde modellenememiştir. Bu durum modellerin kullanılması ile elde edilecek sonuçların doğruluk ve güvenilirliğini önemli ölçüde düşürmektedir.

Bu bağlamda;

- zeminle temas eden yapı kabuğunun (zeminle temas eden döşemesinin alanı, çevre uzunluğu ve zemin yüzeyine göre derinlik değerine bağlı) tüm geometrik özellikleri için hesap olanağı sunabilen esneklikte olacak,
- zeminle temas eden yapı kabuğu için, sadece ürün standardizasyonu açısından kabul edilebilirliği olan ısı yalıtım kalınlık seçenekleri içinden ekonomik yarar açısından en uygununun seçilebilmesine olanak tanıyacak ve
- pratik olarak kullanılabilmesini sağlayacak kadar kısa sürede, doğru ve güvenilir sonuç alınacak

bir optimizasyon modeline gereksinim duyulmaktadır.

Bu çalışmanın amacı da, zeminle temas eden yapı kabuğu için ekonomik yarar açısından en uygun ısı yalıtım kalınlık seçeneğinin belirlenebilmesi için belirtilen tüm bu özelliklere sahip bir optimizasyon modeli geliştirmektir.

## Yöntem

Bir optimizasyon modelinin çalışma kapsamında amaçlanan özelliklere sahip olabilmesi için şu özelliklerde dört bileşeni olmalıdır:

1) Isı yalıtım kalınlık seçenekleri: Modelin, ürün standardizasyonu açısından kabul edilebilirliği olan ısı yalıtım kalınlıklarının,

zeminle temas eden yapı kabuğunun duvar ve döşeme bileşenleri için tüm olası eşleşmelerini kapsayacak “ısı yalıtım kalınlık seçenekleri” olmalıdır.

2) Optimizasyon prosedürü: Modelin, modele özgü olan ısı yalıtım kalınlık seçenekleri içinden hangisinin, bir yapının yaşam dönemi süresince zeminden kaynaklanan toplam ısıtma maliyetinin en düşük olmasını sağlayacağını hızlı ve doğru bir şekilde belirleyecek bir optimizasyon prosedürü olmalıdır.

3) Toplam ısıtma maliyetini hesaplama yöntemi: Gerekli olan toplam ısıtma maliyeti hesaplarında kullanılmak üzere, modelin pratik olarak kullanılabilmesini sağlayacak kadar kısa sürede, doğru ve güvenilir sonuç alınabilecek bir hesaplama yöntemi olmalıdır.

4) Yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen toplam ısı transferini hesaplama yöntemi: Toplam ısıtma maliyeti, yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen toplam ısı transferine de bağlıdır. Bu nedenle, yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen toplam ısı transferinin hesaplanmasında kullanılabilir bir hesaplama yöntemi de gerekmektedir. Bu bağlamda, modelin; yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen toplam ısı transferinin hesaplanmasında kullanılmak üzere;

- zeminle temas eden yapı kabuğunun tüm geometrik özellikleri için hesap olanağı sunabilen esneklikte olacak ve
  - modelin pratik olarak kullanılabilmesini sağlayacak kadar kısa sürede, doğru ve güvenilir sonuç alınacak
- bir hesaplama yöntemi olmalıdır.

Bu nedenle, öncelikle geliştirilecek optimizasyon modelinde kullanılabilir ne tür ısı yalıtım kalınlık seçenekleri, optimizasyon prosedürleri ve hesaplama yöntemleri bulunduğu araştırılmış ve bunlardan yukarıda belirtilen özelliklere sahip olanları belirlenerek yeni bir optimizasyon modeli için bir araya getirilmiştir.

## Isı yalıtım kalınlık seçeneklerinin belirlenmesi

Hava ile temas eden yapı kabuğunda, ısı yalıtım, kabuk yüzeyi boyunca sabit kalınlıkta

uygulanmaktadır. Zeminle temas eden yapı kabuğunda ise, zemindeki sıcaklık dağılımının farklı olması, ısı kaybının en az olması için ısı yalıtımın zeminle temas eden yapı kabuğu yüzeyi boyunca nasıl uygulanması gerektiğini belirleme sürecini daha kompleks hale getirmektedir (Choi ve Krarti, 2000). Şekil 1’de, zeminle temas eden yapı kabuğu için kullanılabilir ısı yalıtım konfigürasyonları verilmiştir.



Şekil 1. Isı yalıtım konfigürasyonları

Isı yalıtım kalınlığının zeminle temas eden yapı kabuğu yüzeyi boyunca sürekli değiştiği ısı yalıtım konfigürasyonlarında, zemin sıcaklığının derinlik artışına bağlı olarak artması dolayısıyla, zeminle temas eden duvarda kullanılan ısı yalıtım kalınlığı derinlik arttıkça

sürekli azalmaktadır. Zeminle temas eden döşemede ise, köşeler zemin yüzeyine daha yakın olduğu için, döşemede kullanılan ısı yalıtım kalınlığı köşelerden ortaya doğru gidildikçe sürekli azalmaktadır.

Isı yalıtım kalınlığının zeminle temas eden yapı kabuğu yüzeyi boyunca kademeli olarak değiştiği ısı yalıtım konfigürasyonları, ısı yalıtım kalınlığının zeminle temas eden yapı kabuğu yüzeyi boyunca sürekli değiştiği ısı yalıtım konfigürasyonlarının uygulama zorluğu ve yüksek maliyeti nedeni ile kullanılabilir alternatif bir yaklaşımdır. Labs tarafından önerilen bu tür konfigürasyonlarda, zemin sıcaklığına bağlı olarak ısı yalıtım kalınlığında sürekli değil de kademeli bir değişim gerçekleşmektedir (Choi ve Krarti, 2000).

Isı yalıtım kalınlığının zeminle temas eden yapı kabuğu yüzeyi boyunca değişmediği ısı yalıtım konfigürasyonları ise, uygulamada en fazla kullanılan konfigürasyonlardır. Bu tür konfigürasyonlarda, zeminle temas eden duvar ve döşemede farklı ısı yalıtım kalınlıkları kullanılabilen ve zemin yüzeyine göre derinlik ile döşeme alanı arttıkça ısı yalıtım kalınlıkları azaltılabilmektedir.

Isı yalıtım kalınlığının zeminle temas eden yapı kabuğu yüzeyi boyunca sürekli değiştiği ısı yalıtım konfigürasyonları ile yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen ısı transferinde daha büyük oranlarda azalma sağlanabilir. Ancak, bu tür konfigürasyonlar, ürün standardizasyonu açısından kabul edilebilirliği olan ısı yalıtım kalınlık seçeneklerine sahip olan konfigürasyonlar değildir. Ayrıca, özel üretimden dolayı ısı yalıtım maliyetleri çok yüksek olacağı için ekonomik açıdan da uygun olmayacaklardır. Isı yalıtım kalınlığının zeminle temas eden yapı kabuğu yüzeyi boyunca kademeli olarak değiştiği ısı yalıtım konfigürasyonları ise oldukça kompleks hesaplama yöntemleri gerektirdikleri ve oldukça kompleks bu hesaplama yöntemlerinin modelde kullanılması durumunda, modelde bulunması amaçlanan özellikler elde edilemeyeceği için bu konfigürasyonlar kapsam dışı tutulmuştur. Bu



nedenle, model için sadece ısı yalıtım kalınlığının zeminle temas eden yapı kabuğu yüzeyi boyunca değişmediği ısı yalıtım konfigürasyonları seçilmiştir.

Üretici firmaların genellikle 0.01 m aralıklı kalınlıklarda ısı yalıtım ürettiği belirlenmiştir. Çok olumsuz koşullar düşünülerek üst kalınlık sınırı da 0.20 m seçilmiştir. Bu durumda, model için, 0.01 m aralıklı 0.01-0.20 m arası tüm ısı yalıtım kalınlıkları dikkate alınmıştır.

### **Optimizasyon prosedürünün belirlenmesi**

Toplam ısıtma maliyetinin en düşük olmasını sağlayacak ısı yalıtım kalınlık seçeneğinin belirlenmesinde kullanılabilir çeşitli optimizasyon prosedürleri bulunmaktadır. Stoecker, bu prosedürleri beş ana başlık altında sınıflandırmıştır: (1) Hesap yöntemleri, (2) Arama yöntemleri, (3) Dinamik programlama, (4) Geometrik programlama, (5) Doğrusal programlama (Stoecker, 1989).

Geliştirilen modelde kullanılan amaç fonksiyonundaki (toplam ısıtma maliyeti fonksiyonu) eşitlikler, sürekli ve doğrusal olmadığı için bazı optimizasyon yöntemleri uygun olmamıştır. Örneğin, optimize edilecek toplam ısıtma maliyeti fonksiyonu sürekli olmadığı için süreksizlik noktalarında fonksiyonun türevi de olmayacağından, optimizasyon yöntemlerinden “hesap yöntemleri” kullanılamamıştır. Benzer şekilde, toplam ısıtma maliyeti fonksiyonundaki eşitlikler doğrusal olmadığı için, “doğrusal programlama” yöntemi de uygun olmamıştır. Dinamik programlama yönteminden elde edecek sonuç ise optimum bir değer değil, optimum bir fonksiyon olacağı için değerlendirmeye alınmamıştır. Bu durumda, “arama yöntemleri” ve “geometrik programlama” arasından bir tercih yapılmak zorunda kalınmıştır. Modelde sadece sonlu ve belirli sayıda ısı yalıtım kalınlık seçeneğinin sınanması amaçlanmıştır. Bu nedenle, arama yöntemlerine özgü bir tekniğin kullanılması daha pratik bulunduğundan, model için bu optimizasyon prosedürü seçilmiştir.

### **Toplam ısıtma maliyetini hesaplama yönteminin belirlenmesi**

Amaç, toplam ısıtma maliyetinin en düşük olmasını sağlayacak ısı yalıtım kalınlık seçeneğinin belirlenmesi olduğu için, modelde toplam ısıtma maliyetinin hesaplanmasında kullanılacak bir hesaplama yöntemi gerekmektedir. Literatür taraması sonucu elde edilen bilgilere göre, yaşam dönemi maliyeti (life cycle costing) adı verilen hesaplama yöntemi, bu amaçla kullanılabilir tek hesaplama yöntemidir. Bu nedenle, model için toplam ısıtma maliyeti hesaplarında kullanılmak üzere bu hesaplama yöntemi seçilmiştir.

Yaşam dönemi maliyetinde iki temel maliyet dikkate alınmaktadır: (1) Yatırım maliyeti (2) İşletme maliyeti. Toplam maliyet, yatırım maliyeti ve işletme maliyetinin toplamından oluşmaktadır. Ancak, gelecekte farklı dönemlerde farklı miktarlarda maliyet değerleri oluşacaktır. Yaşam dönemi maliyeti hesaplama yönteminde, bu maliyetlerin parasal değerlerinde zaman bakımından oluşan farkları ortadan kaldırmak ve bu değerleri eşdeğer hale getirmek için, genellikle eşdeğerlik kavramına dayalı yöntemlerden bugünkü değer yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem ile bu tür maliyetlerin bugünkü değerinde karşılığı bulunarak toplam maliyete etkisi belirlenebilmektedir.

### **Yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen toplam ısı transferini hesaplama yönteminin belirlenmesi**

Toplam ısıtma maliyeti, yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen toplam ısı transferine bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Bu nedenle, modelde, yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen toplam ısı transferinin hesaplanmasında kullanılabilir bir hesaplama yöntemi de gerekmektedir. Yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen ısı transferinin belirlenebilmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler üç ana başlık altında sınıflandırılabilir: (1) Analitik ve yarı analitik yöntemler, (2) Nümerik yöntemler, (3) Basitleştirilmiş yöntemler.

Model için, yapılardan zemin yolu ile

gerçekleşen toplam ısı transferinin hesaplanmasında, “ISO 13370: Thermal performance of buildings- Heat transfer via the ground- Calculation Methods” (ISO 13370, 1998) adlı standartta verilen hesaplama yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem, model için uygun özellikleri olan basitleştirilmiş hesap yöntemlerinden biridir.

## Bulgular ve tartışma

### Modelin esnekliği

Zeminin ısı ortamı havadan farklıdır. Zemin yüzeyi, ısı olarak hava sıcaklığı ve güneş ışınımından etkilenmekte ve bu etki zeminin belirli bir derinliğine kadar görülebilmektedir. Zemin yüzeyi sıcaklığının, hava ve güneşten etkilenmesi ve bu sıcaklığın zemin içine transfer edilmesine rağmen, zeminin ısı depolama özelliği zemin içindeki bu sıcaklık transferinin gecikmesine neden olmaktadır. Bu olaya, zaman gecikmesi etkisi (time lag effect) denmektedir. Bu nedenle, zemin sıcaklığı yaz aylarında derinlik arttıkça azalmakta, kış aylarında ise artmaktadır. Hem yaz hem de kış aylarında, belirli bir derinlikten sonra zemin sıcaklığı sabit kalmaktadır (Kim ve Kim, 2004). Zeminin bu özelliğinden dolayı, zeminle temas eden yapı kabuğu üzerinden gerçekleşen ısı transferi miktarı, zeminle temas eden yapı kabuğunun geometrik (boyut ve biçim) özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu durum, bir modelin zeminle temas eden yapı kabuğunun tüm geometrik özellikleri için hesap olanağı sunabilmesi için zeminle temas eden yapı kabuğunun hem duvar hem de döşeme bileşenleri için aynı anda hesaplama yapabilecek kompleks yapıda bir hesaplama yöntemine sahip olmasını gerektirir.

Geliştirilen model, hem bodrum katlı hem de bodrum katı olmayan yapıların zeminle temas eden kabuğunun tüm geometrik özellikleri için hesap olanağı sunmaktadır. Bu amaçla, modelde, hem bodrum katlı hem de bodrum katı olmayan yapıların zeminle temas eden kabuğunun tüm geometrik özellikleri için hesap olanağı sunan bir hesaplama yöntemi (ISO 13370) kullanılmaktadır. Model, bir kısmında bodrum kat, diğer kısmında bodrum kat

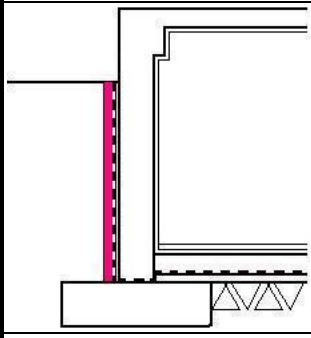
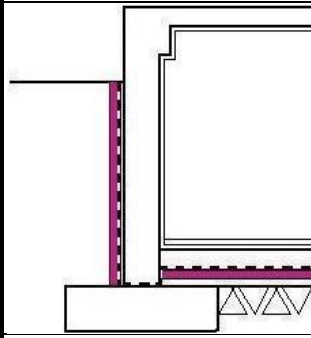
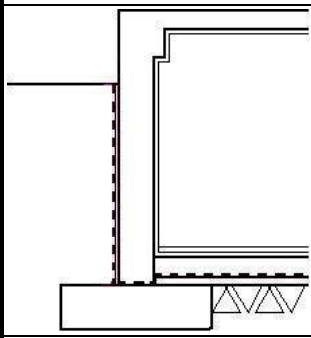
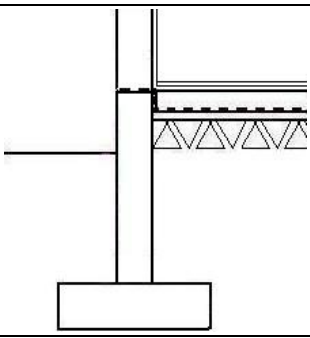
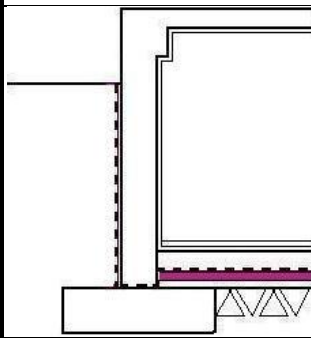
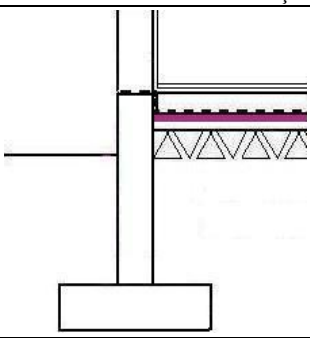
olmayan yapılar için ise yaklaşık bir değerlendirme olanağı sunmaktadır.

### Modelin ısı yalıtım kalınlık seçenekleri

Model, zeminle temas eden yapı kabuğu için, sadece ürün standardizasyonu açısından kabul edilebilirliği olan ısı yalıtım kalınlık seçenekleri içinden ekonomik yarar açısından en uygununun seçilebilmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle, modelin, ürün standardizasyonu açısından kabul edilebilirliği olan ısı yalıtım kalınlıklarının (0.01 m aralıklı 0.01-0.20 m arası tüm ısı yalıtım kalınlıklarının), zeminle temas eden yapı kabuğunun duvar ve döşeme bileşenleri için, ısı yalıtım kalınlığının zeminle temas eden yapı kabuğu yüzeyi boyunca değişmediği ısı yalıtım konfigürasyonları kapsamındaki tüm olası eşleşmelerini kapsayan “ısı yalıtım kalınlık seçenekleri” bulunmaktadır.

Modelin, bodrum katlı yapıların zeminle temas eden yapı kabuğu için, sadece duvar veya sadece döşemede ısı yalıtımın kullanılacağı konfigürasyonlar ile hem duvar hem de döşemede aynı anda ısı yalıtımın kullanılacağı veya kullanılmayacağı konfigürasyonlar kapsamında toplam 441 adet ısı yalıtım kalınlık seçeneği bulunmaktadır. Modelin, bodrum katı olmayan yapıların zeminle temas eden yapı kabuğu için ise, sadece döşeme bileşeni olmasından dolayı döşemede ısı yalıtımın kullanılacağı veya kullanılmayacağı konfigürasyonlar kapsamında toplam 21 adet ısı yalıtım kalınlık seçeneği bulunmaktadır. (Şekil 2).

Modelde, zeminle temas eden yapı kabuğu için, bu ısı yalıtım kalınlık seçenekleri içinden ekonomik yarar açısından en uygununun seçilebilmesine olanak tanıyan bir optimizasyon prosedürü kullanılmaktadır. Bu nedenle, modelin kullanılması ile elde edilecek ısı yalıtım kalınlıkları, piyasada bulunan veya üretimi standardizasyon açısından kabul edilebilir kalınlıklardır. Bu özellik, daha önce geliştirilen hiçbir optimizasyon modelinde bulunmamaktadır.

KONFIGÜRASYON		ISIL YALITIM KALINLIK SEÇENEKLERİ
BODRUM KATLI	BODRUM KATI OLMAYAN	
A. DUVAR ISIL YALITIMLI. DÖŞEME ISIL YALITIMSIZ		
	-	$(d_{iw} - d_{if})^1$ (0.01 - 0.00) (0.11 - 0.00) (0.02 - 0.00) (0.12 - 0.00) (0.03 - 0.00) (0.13 - 0.00) (0.04 - 0.00) (0.14 - 0.00) (0.05 - 0.00) (0.15 - 0.00) (0.06 - 0.00) (0.16 - 0.00) (0.07 - 0.00) (0.17 - 0.00) (0.08 - 0.00) (0.18 - 0.00) (0.09 - 0.00) (0.19 - 0.00) (0.10 - 0.00) (0.20 - 0.00)
B. DUVAR ISIL YALITIMLI. DÖŞEME ISIL YALITIMLI		
	-	$(d_{iw} - d_{if})^1$ (0.01 - 0.01); (0.01 - 0.02)...(0.01 - 0.20) (0.02 - 0.01); (0.02 - 0.02)...(0.02 - 0.20) (0.03 - 0.01); (0.03 - 0.02)...(0.03 - 0.20) . . . ; . . . . . . . . ; . . . . . . . . ; . . . . . (0.17 - 0.01); (0.17 - 0.02)...(0.17 - 0.20) (0.18 - 0.01); (0.18 - 0.02)...(0.18 - 0.20) (0.19 - 0.01); (0.19 - 0.02)...(0.19 - 0.20) (0.20 - 0.01); (0.20 - 0.02)...(0.20 - 0.20)
C. ISIL YALITIMSIZ		
		$(d_{iw} - d_{if})^1$ (0.00 - 0.00)
D. DUVAR ISIL YALITIMSIZ. DÖŞEME ISIL YALITIMLI		
		$(d_{iw} - d_{if})^1$ (0.00 - 0.01) (0.00 - 0.11) (0.00 - 0.02) (0.00 - 0.12) (0.00 - 0.03) (0.00 - 0.13) (0.00 - 0.04) (0.00 - 0.14) (0.00 - 0.05) (0.00 - 0.15) (0.00 - 0.06) (0.00 - 0.16) (0.00 - 0.07) (0.00 - 0.17) (0.00 - 0.08) (0.00 - 0.18) (0.00 - 0.09) (0.00 - 0.19) (0.00 - 0.10) (0.00 - 0.20)

<sup>1)</sup>  $d_{iw}$  duvarda kullanılacak,  $d_{if}$  ise döşemede kullanılacak ısı yalıtımın metre cinsinden kalınlığıdır.

Şekil 2. Geliştirilen modelin ısı yalıtım kalınlık seçenekleri

**Modelin doğruluğu, güvenilirliği ve pratikliği**

Modelden pratik olarak kullanılabilmesini sağlayacak kadar kısa sürede, doğru ve güvenilir sonuç alınabilmektedir.

Modelde, toplam ısıtma maliyetinin hesaplanmasında kullanılan hesaplama yöntemi (yaşam dönemi maliyeti), bir sistemin veya bileşenin tüm yaşam dönemi süresince oluşacak maliyetlerinin analizi için doğru ve güvenilir sonuçlar alınabilecek bir hesaplama yöntemidir. Modelde, yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen toplam ısı transferinin hesaplanmasında kullanılan hesaplama yöntemi (ISO 13370) ise, üç boyutlu simülasyon moduna sahip olması, hem kararlı haldeki hem de periyodik ısı akışlarını dikkate alması gibi elde edilecek sonuçların doğruluk düzeyini arttıracak önemli özellikleri olan bir hesaplama yöntemidir.

Hesaplama yöntemlerinde bazı parametrelerin etkileri dikkate alınmadığı zaman bazı varsayımlarda bulunulmuş olmaktadır. Yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen toplam ısı transferini belirlemek için geliştirilen çoğu hesaplama yönteminde bazı varsayımlarda bulunulmaktadır. ISO 13370'de de bazı varsayımlarda bulunulmuştur. Bu varsayımlardan bazıları şunlardır: ISO 13370, zeminin ısı iletkenliğinin ve ısı kapasitesinin tüm zemin bölgesinde aynı olduğu varsayımına dayanmaktadır. Ayrıca, nemden kaynaklanan ısı transfer mekanizmalarını dikkate almamakta, sadece birçok durumda zeminde en etkin olan ısı transfer mekanizması olan kondüksiyon yolu ile gerçekleşen ısı transferini hesaplamaktadır. ISO 13370'deki bu varsayımların dikkate alındığı bir çalışmada (Janssen vd., 2004), ısı ve nem transferinin birlikte ele alındığı dinamik bir nümerik hesaplama yöntemi ile iki boyutlu hesaplamalar için dahi iki günlük bir bilgisayar hesaplama süresi gerekmektedir. Böyle bir hesaplama yönteminin pratik olarak kullanılma olasılığı yoktur. Ayrıca, benzer bir çalışmadan elde edilen verilere göre, zemin yüzeyindeki nem içeriğinin artmasının, hem bodrum katı olmayan hem de bodrum katlı yapılardan zemin yolu ile gerçekleşen ısı transferine etkisinin kış mevsiminde çok düşük olduğu görülmektedir (Deru, 2001). Bu durumda, bir yapının ısıtma enerjisi ihtiyacının belirlenmesinde kullanılacak bir hesaplama yönteminde, bu parametrenin modellenmesinin, elde edilecek sonuçlara önemli bir etkisi olmayacaktır. Bir hesaplama

yönteminin doğruluğunun belirlenebilmesi için en etkili yol, bu hesaplama yönteminden elde edilen sonuçların, alan çalışmalarından elde edilen gerçek sonuçlarla karşılaştırılmasıdır. ISO 13370, böyle bir alan çalışmasından (Thomas ve Rees, 1999) elde edilen gerçek sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçların oldukça uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, ISO 13370, doğrulaması (validation) yapılmış bir hesaplama yöntemidir.

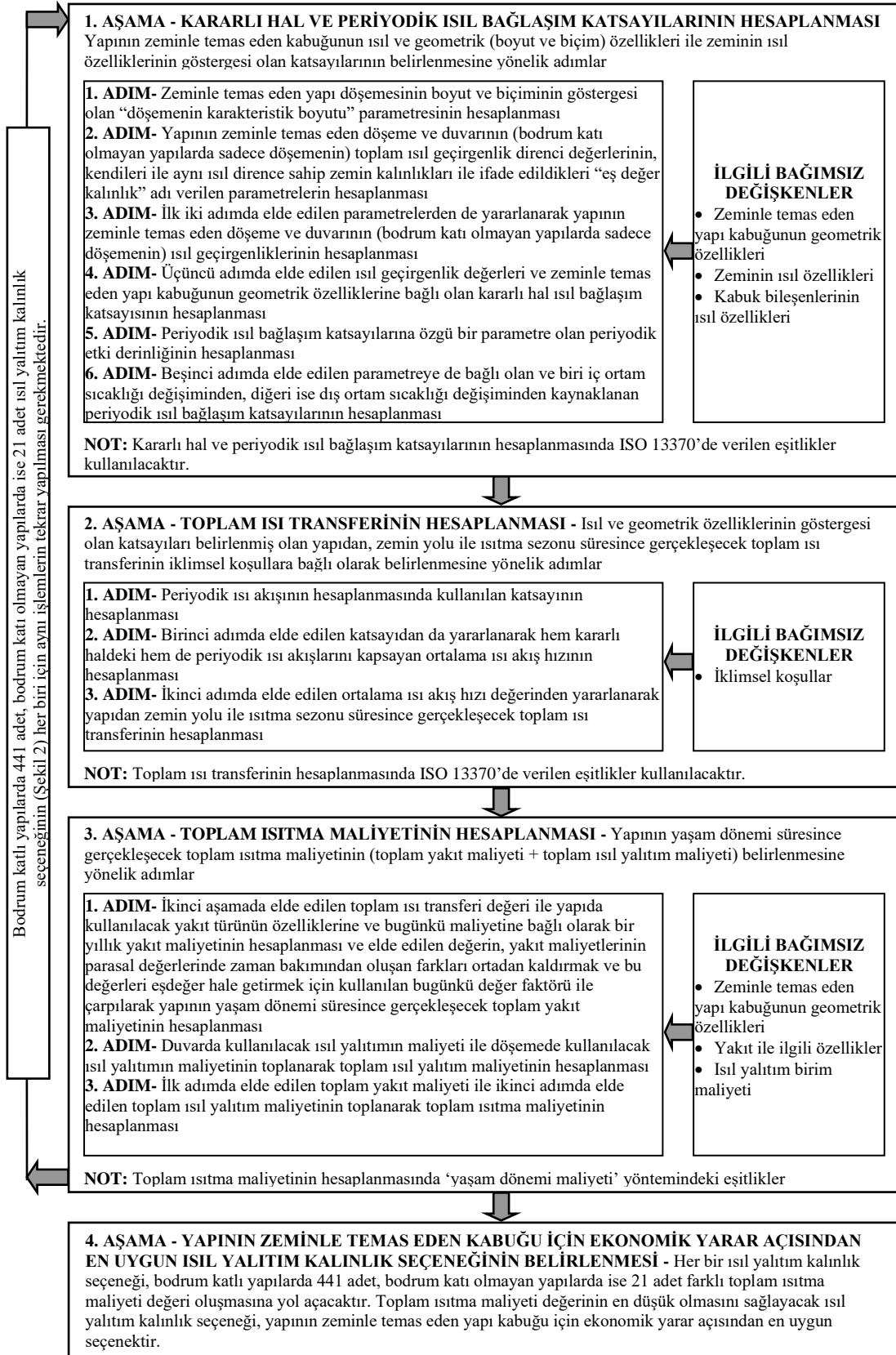
Modelden pratik olarak kullanılabilmesini sağlayacak kadar kısa sürede sonuç alınabilmektedir. Modelde kullanılan hesaplama yöntemleri, kısa sürede sonuç alınmasına olanak tanımaktadır. Ancak, modelde kullanılan optimizasyon prosedürü (Şekil 3), her bir ısı yalıtım seçeneği için ayrı hesaplama yapılmasını gerektirdiği için, klasik bir el hesap makinesi kullanarak sonuç alınması uzun sürebilmektedir. Bu nedenle, hızlı bir şekilde sonuç alınabilmesi için, modelin bir bilgisayar programı versiyonu geliştirilmiştir. Bu amaçla, modelde dikkate alınan ısı yalıtım kalınlık seçenekleri, kullanılan optimizasyon prosedürü ve hesaplama yöntemleri, Microsoft Excel'de kurulmuştur.

Bilgisayar programının kullanıcı arayüzü olarak dizayn edilen sayfası (Şekil 4), girdilerin ve çıktıların yer aldığı iki ana bölümden oluşmaktadır.

Girdiler bölümünde hesaplama yöntemlerinin bağımsız değişkenleri altı ana başlık altında yer almaktadır:

- 1) Zeminle temas eden yapı kabuğunun geometrik özellikleri
- 2) İklimsel koşullar
- 3) Yakıt ile ilgili özellikler
- 4) Zeminin ısı özellikleri
- 5) Kabuk bileşenlerinin ısı özellikleri
- 6) Isı yalıtım birim maliyeti

Girdiler bölümünde bağımsız değişkenler sadece sembolleri ile yer almıştır fakat mouse, sembolün yer aldığı hücreye getirildiğinde simgenin açıklaması ve birimi görülebilmektedir (Şekil 4).



Şekil 3. Geliştirilen modelde kullanılan optimizasyon prosedürü

ZEMİNLE TEMAS EDEN YAPI KABUĞUNUN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ			İKLİSEL KOŞULLAR					
A	P	z	$T_i$	$T_e$	Yıllık ortalama zemin yüzeyi sıcaklığı, (°C)	n	N	
2500	200	3	20	12,2		8	243	
GİRDİLER			YAKIT İLE İLGİLİ				ZEMİNİN ISIL ÖZELLİKLERİ	
			$C_f$	$\eta_s$	LHV	PWF	$\lambda_f$	$\rho c$
			1,063	0,8	41344650	12,71	2	2000000
KABUK BİLEŞENLERİNİN ISIL ÖZELLİKLERİ				ISIL YALITIM BİRİM MALİYETİ				
$R_w$	$R_f$	w	$\lambda_i$	$R_{siw}$	$R_{sif}$	$C_{il}$	$C_{if}$	$C_{iz}$
0,168	0,112	0,3	0,03	0,13	0,17	157	150	178
ÇIKTILAR		EN UYGUN ISIL YALITIM KALINLIK SEÇENEĞİ	TOPLAM ISIL YALITIM MALİYETİ (\$)	TOPLAM YAKIT MALİYETİ (\$)	TOPLAM ISITMA MALİYETİ (\$)	EKONOMİK YARAR (%)		
		DUVAR İÇİN	DÖŞEME İÇİN					
		0,06	0	5400	45972	51372	35	

Şekil 4. Bilgisayar programında kullanıcı arayüzü

Çıktılar bölümünde ise, bilgisayar programının kullanılması ile elde edilecek sonuçlar beş ana başlık altında yer almaktadır:

- 1) En uygun ısı yalıtım kalınlık seçeneği (duvar ve döşeme için, m)
- 2) Toplam ısı yalıtım maliyeti, USD
- 3) Toplam yakıt maliyeti, USD
- 4) Toplam ısıtma maliyeti, USD
- 5) Ekonomik yarar, %

Bilgisayar programına, hesaplama yöntemlerinin bağımsız değişkenleri ile ilgili değerler girildikten hemen sonra sonuç alınabilmektedir. Tüm hesaplamalar, optimizasyon prosedürüne uygun olarak program tarafından yapılmaktadır.

## Sonuç

Bu çalışmada, zeminle temas eden yapı kabuğu için ekonomik yarar açısından en uygun ısı yalıtım kalınlık seçeneğinin belirlenebilmesi için bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir.

Geliştirilen modelin özellikleri şunlardır:

- Model, hem bodrum katlı hem de bodrum katı olmayan yapıların zeminle temas eden

kabuğunun tüm geometrik özellikleri için hesap olanağı sunmaktadır.

- Model, zeminle temas eden yapı kabuğu için, sadece ürün standardizasyonu açısından kabul edilebilirliği olan ısı yalıtım kalınlık seçenekleri içinden ekonomik yarar açısından en uygununun seçilebilmesine olanak tanımaktadır (Bu özellik, daha önce geliştirilen hiçbir optimizasyon modelinde bulunmamaktadır).
- Modelden pratik olarak kullanılabilmesini sağlayacak kadar kısa sürede, doğru ve güvenilir sonuç alınabilmektedir.

Bir modelin problem çözümüne katkı yapması için şu iki kritere uygun olması gerektiği düşünülmektedir: Modelin, konu ile ilgili tasarımcılar tarafından tercih edilmesine neden olacak özellikleri bulunmalı ve bu modelin kullanılması ile yüklenici ve yapı kullanıcılarının ekonomik yararına olacak sonuçlar elde edilmelidir. Bu bağlamda, geliştirilen modelin bu iki kritere de uygun olduğu düşünüldüğünden uygulamada kullanılması ve böylece problem çözümüne önemli bir katkı sağlaması umulmaktadır.

Bu konu ile ilgili çalışma yapacak kişilere ise şu öneride bulunulabilir: Zeminle temas eden yapı kabuğunun duvar ve döşeme bileşenlerinde hangi kalınlıklarda ısı yalıtım kullanılmasının en uygun çözüm olacağı yapılarda kullanılan ısıtma enerjisinin hangi amaçla azaltılmak istendiğine bağlıdır. Bu çalışmada öncelikli amaç ekonomik yarar olarak belirlenmiştir. Ekonomik yarar açısından en uygun olan ısı yalıtım kalınlıkları aynı zamanda mutlaka çevresel yarar da sağlayacaktır. Ancak, öncelikli amacın çevresel yarar olacağı çalışmalar da yapılabilir. Bu durumda, ölçüt olarak çevreye zararlı emisyonlar alınabilir.

## Kaynaklar

- Açıkkalp, E. ve Kandemir, S.Y., (2019). A method for determining optimum insulation thickness: Combined economic and environmental method, *Thermal Science and Engineering Progress*, 11, 249-253.
- Al-Sanea, S.A., Zedan, M.F. and Al-Ajlan, S.A., (2005). Effect of electricity tariff on the optimum insulation-thickness in building walls as determined by a dynamic heat-transfer model, *Applied Energy*, 82, 313-330.
- Bolattürk, A., (2006). Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey, *Applied Thermal Engineering*, 26, 1301-1309.
- Carmody, J., Christian, J. and Labs, K., (1991). *Builder's foundation handbook*, U.S. Department of Energy, USA.
- Choi, S. ve Krarti, M., (2000). Thermally optimal insulation distribution for underground structures, *Energy and Buildings*, 32, 251-265.
- Çomaklı, K. and Yüksel, B., (2003). Optimum insulation thickness of external walls for energy saving, *Applied Thermal Engineering*, 23, 473-479.
- Deru, M., (2001). A model for ground-coupled heat and moisture transfer from buildings, *Doktora tezi*, Colorado State University, USA.
- Dylewski, R. ve Adamczyk, J., (2011). Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls, *Building and Environment*, 46, 2615-2623.
- Evin, D. ve Ucar, A., (2019). Energy impact and eco-efficiency of the envelope insulation in residential buildings in Turkey, *Applied Thermal Engineering*, 154, 573-584.
- Gönül, İ.A., (2008). Zeminle temas eden yapı kabuğu için ekonomik ısı yalıtım kalınlığının seçilmesinde kullanılabilir bir model, *Doktora tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- ISO 13370, (1998). Thermal performance of buildings- Heat transfer via the ground- Calculation Methods, *The International Organization for Standardization*, Switzerland.
- Janssen, H., Carmeliet, J. ve Hens, H., (2004). The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground, *Building and Environment*, 39, 825-836.
- Jie, P., Zhang, F., Fang, Z., Wang, H. ve Zhao, Y., (2018). Optimizing the insulation thickness of walls and roofs of existing buildings based on primary energy consumption, global cost and pollutant emissions, *Energy*, 159, 1132-1147.
- Kalema, T., (2001). Optimisation of the thermal performance of buildings- The OPTIX program, *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, 2, 1-22.
- Kaynaklı, Ö., (2012). A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 415-425.
- Kim, B.S. and Kim, K., (2004). Analyses on thermal insulation performance of earth-covered wall for residential underground space by using a numerical simulation program, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 3, 259-266.
- Nematchoua, M.K., Ricciardi, P., Reiter, S. ve Yvon, A., (2017). A comparative study on optimum insulation thickness of walls and energy savings in equatorial and tropical climate, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6, 170-182.
- Oak Ridge National Laboratory, (2002). *Insulation fact sheet*, U.S. Department of Energy Report DOE/CE-0180/with Addendum 1, USA.
- Sevindir, M.K., Demir, H., Ağra, Ö., Atayılmaz, Ö. ve Teke, İ., (2017). Modelling the optimum distribution of insulation material, *Renewable Energy*, 113, 74-84.
- Simona, P.L., Spiru, P. ve Ion, I.V., (2017). Increasing the energy efficiency of buildings by thermal insulation, *Energy Procedia*, 128, 393-399.
- Stoecker, W.F., (1989). *Design of thermal systems*, McGraw Hill, USA.
- Thomas, H.R. and Rees, S.W., (1999). The thermal performance of ground floor slabs- a full scale in-situ experiment, *Building and Environment*, 34, 139-164.

## **A model proposal for the thermal insulation thickness of the building envelope that contacts the ground**

### **Extended abstract**

*In this study, it was aimed to develop an optimization model which can be used for determining the most appropriate thermal insulation thickness option in terms of economic benefit for the building envelope that contacts the ground and which will*

- *be flexible enough to account for all geometrical properties of the building envelope that contacts the ground,*
- *determine the most appropriate thermal insulation thickness option in terms of economic benefit among the thermal insulation thickness options that are acceptable in terms of product standardization,*
- *give accurate and reliable results in a short time that will make the model useful in practical terms.*

*Such an optimization model should have the following components: Thermal insulation thickness options, optimization procedure, calculation method for the total heating cost and calculation method for the total heat transfer through the ground. In this context, first, thermal insulation thickness options, optimization procedures, and calculation methods were investigated, and then the ones that had the desired features were merged to form a new optimization model.*

*The developed model offers calculation chance for all the geometric properties of the ground contact envelope of both the buildings that have a basement floor and the buildings that have a slab-on-ground. For this purpose, in the model, a calculation method (ISO 13370) is used which can give results for all geometrical properties of the building envelope that contacts the ground.*

*Model can determine the most appropriate insulation thickness option in terms of economic benefit for the building envelope that contacts the ground among the thermal insulation thickness options that are acceptable in terms of product standardization. The model has “thermal insulation thickness options” which cover all possible matching of thermal insulation thicknesses (all*

*thicknesses between 0.01 and 0.20 m with a range of 0.01 m), that are acceptable in terms of product standardization. In the model, an optimization procedure is used that allows the selection of the most appropriate option in terms of economic benefit from these thermal insulation thickness options for the building envelope that contacts the ground. Therefore, the thermal insulation thicknesses obtained by using the model are those available on the market or acceptable for production standardization. This feature is not available in any previously developed optimization model.*

*Accurate and reliable results can be obtained from the model in a short time to ensure that it can be used practically. In the model, the calculation method (life cycle costing) used in the calculation of the total heating cost is a calculation method that can give accurate and reliable results for the analysis of the costs of a system or component during the whole life cycle. In the model, the calculation method (ISO 13370) which is used to calculate the total heat transfer through the ground, is a calculation method that has important features that will increase the accuracy level of the results to be obtained such as having a three-dimensional simulation mode and considering both steady-state and periodic heat flows. The calculation methods used in the model can give results in a short time. However, since the optimization procedure used in the model requires separate calculations for each thermal insulation thickness option, it may take a long time to obtain results using a conventional handheld calculator. Therefore, a computer program version of the model has been developed in order to obtain fast results.*

*In order for a model to contribute to problem solving, it is considered that it must meet the following two criteria: The model should have features that will make it preferred by the relevant designers, and the results obtained by the use of this model should be economically beneficial for the contractor and building users. In this context, since the developed model is considered to meet both criteria, it is hoped that it will be used in practice and thus make an important contribution to problem solving.*

**Keywords:** *ground, building envelope, thermal insulation thickness, optimization model, economic analysis*





# Sürdürülebilirlik Kavramı ve Ekserji Analizi: Binaların Isıtma Sistemlerine Yönelik Bir Uygulama

**Cem Tahsin Yücer\***

Milli Savunma Üniversitesi, Hava Astsubay MYO, İzmir  
[cyucer@msu.edu.tr](mailto:cyucer@msu.edu.tr) ORCID: 0000-0002-4848-867X, Tel: (232) 251 16 00 (5099)

**Hüseyin Kudak**

[hkudak@ttmail.com](mailto:hkudak@ttmail.com) ORCID: 0000-1234-5678-9012

Geliş: 01.10.2019, Revizyon: 21.12.2019, Kabul Tarihi: 27.01.2020

## Öz

*Sürdürülebilirliğin temel yaklaşımında, günümüz ihtiyaçlarının karşılanmasında gelecek nesillerin ihtiyaçlarının da düşünülmesi esas alınır. Sürdürülebilirlik günümüzde farklı uygulama alanları bulunduğu gibi, toplumsal olarak da kabul gören bir kavram haline gelmektedir. Sürdürülebilirlik kavramı, kırk yılı aşkın bir geçmişe dayansa da günümüzde daha çok sürdürülebilir kalkınma olarak ele alınır. Sürdürülebilir enerji uygulamaları kapsamında ele alınan hususlarından biri de ekserji kavramıdır. Bu kavram özellikle enerjiye dayalı hizmetlerin (ısıtma, aydınlatma vb.) sağlanmasına yönelik uygulamalarda öne çıkmaktadır. Çalışmada, sürdürülebilirlik kavramı açıklanarak, sürdürülebilirliğin önemli etmenleri vurgulanmıştır. Sürdürülebilirliğin geniş uygulama alanlarından biri olan sürdürülebilir enerji uygulamaları kapsamında, binaların ısıtma sistemlerine yönelik bir uygulama incelenmiştir. Ekserji analizi sonuçlarına göre düşük ekserji kaybusıtıcı basamağına aittir. Bununla birlikte en yüksek Ekserji Verimi, Ekserjetik Sürdürülebilirlik Endeksi değerleri ısıtıcı basamağı için %94,8 ve 18,287 olarak bulunmuştur. En düşük atık ekserji oranı ve çevresel etki faktörü %5,2 ve 0,055 olarak hesaplanmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Sürdürülebilirlik; Sürdürülebilir Enerji; Ekserji Analizi; Enerji Verimliliği; Isıtma Sistemleri.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Sürdürülebilirlik, günümüzde sıkça duyulan bir kavram haline gelerek, kullanım alanları yaygınlaşmaktadır. Özellikle de sürdürülebilir kalkınma daha çok kullanılan bir kavram olmuştur. Bu çerçevede sürdürülebilir kalkınma, şirketlerin hatta ülkelerin öncelikli hedefleri arasında kendini göstermeye başlamıştır. Bu kapsamda şirketler kârlılıklarını ön planda bulundurmanın yanında çevresel, sosyal ve kurumsal yönetime ilişkin yaklaşımları ile rekabet gücünü koruyabilirler. Sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi için katma değer yaratan faktörlerin belirlenebilmesi, bilginin artırılması ve şeffaflığın sağlanması şirket politikalarında zaruri hale gelmektedir (Borsa İstanbul, 2014).

Sürdürülebilirliğin yaygın kullanımı, özellikle geniş uygulama alanlarının bulunmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, günümüz üretim ve kurumsal politikalarında çevre anlayışının önem kazanması da etkin rol oynamıştır. Son zamanlarda, sektör bazında en hızlı büyüme görülen alanlar incelendiğinde: Enerji sektöründe rüzgâr enerjisi, turizm sektöründe eko turizm, yatırım alanında sosyal sorumluluk yatırımları ve tarımda organik tarımın bulunduğu görülmektedir (Hitchcock & Marsha Willard, 2006). Sürdürülebilirliğin yaygın kullanımının görüldüğü alanların, aynı zamanda sektöründe de kendini ön plana çıkardığı görülmektedir.

Günümüz toplumlarında teknoloji kullanımı, bizleri enerjiye tümüyle bağımlı hale getirmiştir. Enerji, günlük hayatın en temel gereksinimi haline gelmiştir. Bundan sadece otuz yıl öncesinde yaşanan elektrik kesintileri, bizleri sadece “ödev yapmaktan alıkoyarken”, artık bu durum toplumda kaos yaratabilmektedir. Enerji, ihtiyaçlarımızı karşılamamızın ötesinde, oluşumu ve kullanım şekli ile toplumsal değişimleri ortaya koyan, medeniyeti tanımlayan bir kavram olmuştur. Gerek sürdürülebilir enerjiler gerekse konvansiyonel enerjiler; kaynak temini,

depolama ve dönüşüm aşamalarında maliyeti yüksek ve teknoloji yoğun sistemlerdir. Söz konusu kısıtlar yeni yaklaşımları zaruri hale getirmektedir. Ülkelerin ekonomik kalkınmaları yolunda enerji bağımsızlıklarını elde etme arzuları ve iklim değişikliğinde geline tehlikeli nokta, sürdürülebilir enerjiyi gündeme taşımıştır. Sürdürülebilir enerji “yeşil devrim” ve “temiz teknoloji” gibi kavramlarla da ifade bulmaya başlamıştır (Montgomery, 2014). Sürdürülebilir enerji uygulamaları kapsamında ele alınan hususlardan biri de ekserji kavramıdır. Bu kavram özellikle enerjiye dayalı hizmetlerin (ısıtma, aydınlatma vb.) sağlanmasına yönelik uygulamalarda öne çıkmaktadır. Ekserji, enerjinin kullanılabilirlik ve kalitesinin ölçümü olarak tanımlanır. Ekserji yöntemi, daha verimli enerji kaynaklarına ulaşmada fayda sağlar ve böylece sürdürülebilirlik çabalarına da yardımcı olur (Rosen, 2009).

Bu çalışmada sürdürülebilirlik kavramının literatürde ne şekilde çalışıldığı anlatılmıştır. Devamında bir ısıtma sistemindeki ısı kayıpları, ekserji analizi yöntemiyle incelenmiştir. Ekserji analizi tüm ısıtma sistemi basamakları için uygulanmıştır. Elde edilen ekserji kayıpları dikkate alınarak ısıtma sisteminin sürdürülebilirliği analiz edilmiştir. Isıtma sisteminin ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri hesaplanmıştır. Böylece ısıtma sistemi basamakları arasında iyileştirmeye ihtiyaç duyulan alanlar belirlenmiştir.

## Materyal ve Yöntem

### Sürdürülebilirliğin Tanımı

Sürdürülebilirlik tanımına yönelik açıklamalar incelendiğinde, yaşam kalitesinin artırılırken etik anlayışının ve doğal kaynakların korunmasının esas alındığı görülür. (Şirketlerin 2014 Planları, Ekim 2013). Sürdürülebilirlik kavramı gerek bireysel gerekse kurumsal anlamda kârlılığın yanında itibar, etik unsurlar ve sosyal sorumluluk olarak yüksek katma değerlerin kazanımını sağlamaktadır. Bireysel

ve kurumsal farklılıkların yanında, ülkelerin planlama stratejilerinde de sürdürülebilirlik anlayışı yer alır.

Sürdürülebilir kalkınmanın en yaygın tanımı, Brundtland Raporunda; “Bugünün ihtiyacını karşılarken, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılayabilmelerinden ödün vermemektir.” şeklinde yapılmıştır (Our Common Future, Brundtland Report, 1987). Sürdürülebilirlik temelde neyi, nasıl kullandığımıza ve geride ne bıraktığımıza dayanır. Bununla birlikte, ortaya konan bir şeyin sürdürülebilirliğini sağlayamamak, o şeyi değersiz kılar.

Sürdürülebilirlik hakkında faaliyet gösteren uluslararası organizasyonlar incelendiğinde, BM’in öncülüğünde oluşturulanlar başta olmak üzere öne çıkan kuruluşlar (Gönel, 2018):

- Birleşmiş Milletler Çevre Programı<sup>1</sup>,
- Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Konferansı<sup>2</sup>,
- Dünya Ticaret Örgütü<sup>3</sup>,
- Dünya Vahşi Hayat Fonu<sup>4</sup>,
- Dünya Doğal Kaynaklar Enstitüsü<sup>5</sup>
- Sürdürülebilir Kalkınma için Dünya İş Konseyi<sup>6</sup>,
- Uluslararası Doğayı Koruma Birliği<sup>7</sup> sayılabilir.

Sürdürülebilirlik, yeni akım bir kavram olarak algılansa da aslında çok eski dönemlerden beri gündemdedir. Terim olarak belki kullanılmamış, ancak felsefesi veya işlerliği hep göz önünde bulundurulmuştur. Sürdürülebilirlik fikri kırk yılı aşkın bir geçmişe dayanır. Sürdürülebilirlik kavramının oluşumunda, farklı kavramlar da gündeme gelmiş olup, 1984 yılında “Çevresel Mükemmellik – Environmental Excellence”,

1986 yılında “Yeşil Tüketici – Green Consumer” kavramları ortaya konmuştur. Böylelikle çevresel hususlar konusunda hassasiyetler gün yüzüne çıkmaya başlamıştır (Elkington). Bu yaklaşım ile sürdürülebilirliğin tarihsel gelişimine ait dönüm noktaları Tablo 1’de incelenmiştir.

**Tablo 1.** Sürdürülebilirliğin Tarihsel Gelişimi.

Dönüm Noktaları	Kapsam
Uluslararası Doğayı ve Doğal Kaynakları Koruma Birliği (IUCN) 9. Genel Kurulu (1966)	Maksimum Sürdürülebilir Kazanım (Maximum Sustainable Yield) jargon olarak kullanılmıştır.
Uluslararası Doğayı ve Doğal Kaynakları Koruma Birliği (IUCN) 10. Genel Kurulu (1969)	Yeni zorunluluklar vurgulanmış. İnsan hayatının sürdürülebilir kalitesini en üst düzeyde tutmak için doğal kaynakların yönetimi ele alınmıştır.
Stokholm Konferansı (1972)	Gelişmiş ülkelerin, küresel kalkınmanın çevresel sonuçlarına yönelik kaygıları ile gelişmekte olan ülkelerin ekonomik kalkınmaya duydukları ihtiyaçlara yönelik ortak bir yol arayışı, sürdürülebilirlik kapsamında ilk hassasiyetler olarak belirmiştir.
Dünya Koruma Stratejisi (1980)	Canlı türlerinin ve ekosistemin sürdürülebilir bir şekilde kullanılması zorunluluğu belirtilerek, sürdürülebilir kalkınmanın yolunun, insan sağlığı ve esenliği için gerekli olan canlı kaynakları koruyan gelişim modellerini keşfetmek ve uygulamak olarak vurgulanmıştır.
Brundtland Raporu (1987)	Sürdürülebilirliğin en yaygın tanımının yapıldığı ve “Bizim Ortak Geleceğimiz” olarak da bilinen rapordur.
Rio Zirvesi (1992)	Sürdürülebilirliğin çevre boyutuna ilişkin çevre ve iklim değişikliği sorunları ele alınmıştır.
Kyoto Protokolü (1997)	BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında karbondioksit ve sera gazlarına ilişkin ülkelerin taahhütleri

<sup>1</sup> UNEP- United Nations Environment Programme.

<sup>2</sup> UNCSD- United Nations Conference for Sustainable Development.

<sup>3</sup> WTO- World Trade Organization.

<sup>4</sup> World Wide Life Fund.

<sup>5</sup> World Resources Institute.

<sup>6</sup> World Business Council on Sustainable Development.

<sup>7</sup> International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN).

	belirlenmiştir.
Küresel Raporlama Girişimi (1997)	Dünya çapındaki işletmelerin ve hükümetlerin iklim değişikliği, insan hakları, yönetim ve sosyal refah gibi kritik sürdürülebilirlik konularına olan etkilerini anlamalarına ve iletişim kurmalarına yardımcı olmaktadır. İlk defa Sürdürülebilirlik Raporlaması Rehberi yayınlanmıştır.
BM Küresel İlkeler Sözleşmesi (2000)	Şirketlere insan hakları, iş gücü, çevre ve yolsuzlukla mücadele konularında evrensel ilkeler ile stratejileri ve operasyonları uyumlu hale getirmek ve toplumsal hedefleri ilerletmek için harekete geçmek için yapılan çağrılardır.
BM Sorumlu Yatırım Prensipleri Girişimi (2005)	Yatırımları, toplumların daha geniş sürdürülebilir hedefleri ile uyumlu hale getirmelerini teşvik eden ve yardımcı olan program geliştirilmiştir.
BM Devletlerarası İklim Değişikliği Paneli IV (2007)	İklim değişikliğinin sürdürülebilir kalkınma politikaları ile bütünleşmesine dikkat çekilmiştir.
Sürdürülebilir Borsalar Girişimi (2009)	Borsaların paydaşları arasında sürdürülebilirliğe ilişkin farkındalığı artırmaya yönelik katkılar sunulmuştur.
Rio+20 Zirvesi (2012)	“İstedığımız Gelecek” raporu sürdürülebilir kalkınmaya ulaşmak için yeni bir ivme yaratmıştır.
Uluslararası Entegre Raporlama Çerçevesi (2013)	Sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin kuruluşların iş modeli ve stratejilerine entegresine kavramsal destek sunmuştur.
Dünyamızı Dönüştürmek (2015) Paris Anlaşması	17 sürdürülebilir kalkınma amacı ve 169 ilgili hedefle birlikte, evrensel, bütünleşik ve dönüştürülebilir 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi geliştirilmiştir. Paris Anlaşması ile de küresel iklim çabasında yeni bir rota çizilmiştir.

## Sürdürülebilirlik Dinamikleri Nelerdir

Sürdürülebilirlik farklı şekillerde tanımlanabilirken, genelde üç temel bileşeni olarak ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarda değerlendirilir. Sadece ekonomik sürdürülebilirlikte başarı, diğer unsurlar göz ardı edildiğinde nihai başarıya ulaştırmaz. Birbirleri arasındaki dengenin sağlanabilmesi de zaruridir (Rosen, 2009).

Her üç boyutun karşılıklı etkileşimleri konusunda farklı çalışmalar sunulmaktadır. Çevre boyutunun sosyal boyut ile etkileşiminde yaşama ve çalışma koşulları ön plana çıkarken; ekonomi boyutu ile etkileşiminde çevresel verimlilik ön plana çıkmaktadır. Buna karşılık sosyal ve ekonomik boyutun, çevre üzerindeki etkileşiminde ise çevre kaynakları hususu öne çıkmaktadır (Gönel, 2018). Sosyal sorumluluk anlayışı temelde, toplumun hayat standardını yükseltip ekonomik kalkınmaya katkı sağlamaya yönelik girişimler olarak tanımlanır (Borsa İstanbul, 2014). Şirketler sürdürülebilir yaklaşıma, genelde çevresel sorunlara karşı hassasiyetlerini vurgulayarak gösterme eğilimindedirler. Ancak, sürdürülebilir yaklaşımın bütüncül, uygulanabilir projeler ile ele alınması gerekir. Bir etiket olarak değerlendirilmenin ötesinde gayret gerektirir.

Ülkelerin sürdürülebilirlikteki risk değerlendirmeleri, özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında farklı yaklaşımlar gösterebilmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkeler için sürdürülebilir kalkınma, uzun vadeli yatırımları gerektirir (Gönel, 2018). Sürdürülebilirlik kapsamında uluslararası alanda yasal düzenlemeler ve yaptırımlar konusunda halen netliğin sağlanamamış olması, ülkeleri her üç boyuta yaklaşımını farklılaştırmaktadır. Ülkelerin ekonomideki sürdürülebilirliğinin sağlanması, sosyal boyutta katkı sağlarken çevresel hassasiyetlerin bazen göz ardı edilmesine neden olabilmektedir. Bu alanda yaşanan çelişkilere verilebilecek örneklerden biri de, Paris Anlaşmasının, ABD'ye getireceği ekonomik yükten oluşan kaygılarından dolayı ABD'nin söz konusu anlaşmadan çekilme kararı almasıdır. Burada da görüleceği gibi ekonomik

boyut ele alınırken, diğer boyutlar tamamen göz ardı edilebilmektedir. Ancak, sürdürülebilirlikte temel yaklaşım tüm boyutlarda dengeli ve bütünlük şeklinde sağlanabilmesidir.

Elkington sürdürülebilirlikte yedi köklü değişikliği; pazarlar, değerler, şeffaflık, ömür devri teknolojisi, ortaklıklar, zaman ve kurumsal yönetim başlıklarında ele almıştır. Sürdürülebilirliğin, belirtilen alanlarda eski yaklaşımlardan ciddi değişimlere neden olması değerlendirilmektedir (Elkington,2018);

- İşletmeler rekabete daha açık pazarlarda iş görecektir.
- Dünya çapında insani ve sosyal değerlerde değişimler görülmektedir.
- Tüm faaliyetlerin uluslararası alanda yoğun bir değerlendirme baskısı altına girmesi, açıklık yaklaşımını yaygınlaştırırken, bilişim teknolojileri ve yeni değerler sistemi, şeffaflığı yönlendiren etmen olmaktadır. Şeffaflık, özellikle firmaların tüm faaliyetleri boyunca açık bir şekilde davranabilmeleri, sorumluluklarında hassasiyeti ve gelişimlerine yönelebilmelerini sağlamaktadır.
- Ürün ve teknolojilerin ömür devrinde, beşikten mezara anlayışıyla, ürünün hammaddeden itibaren elden çıkıncaya kadarki tüm sürecin fonksiyonları değerlendirilmelidir.
- Şirketler veya örgütler arasında oluşturulacak ortak yaşam anlayışında işbirliği yapılaşmaları sağlanmalıdır.
- Zaman anlayışı, gelecek nesillerin hatta yüzyılların dikkate alındığı uzun bir süreye bakışı gerekli kılar.
- Daha iyi bir kurumsal yönetim sistemi, gerçek sürdürülebilir sermayenin oluşturulmasında daha fazla şans demektir. Aynı zamanda sürdürülebilirlik hususu sadece süreç ve ürün tasarımı ile ilgili değil, şirketler ve bunların değer zincirlerini de kapsar.
- Kurumsal yönetimin ana ilkeleri; adillik, şeffaflık, hesap verebilirlik ve

paydaşlara karşı sorumluluktur (Borsa İstanbul, 2014).

Söz konusu değişimler, aynı zamanda sürdürülebilirlik dinamikleri olarak da ele alınabilir. Söz konusu dinamiklere ek olarak; ekosistem, yenilik (inovasyon), verimlilik, denge, adalet, bilinçlenme, toplumsal katılım, sosyal kabul edilebilirlik, estetik, nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler sürdürülebilirlikte önemli etmenler olarak ele alınır.

Sürdürülebilirliğin en temel dinamiği ekosistemdir. **Ekosistem** insanlık için sürdürülebilir gıda, sürdürülebilir yaşam, sürdürülebilir enerji kaynakları konusunda geniş bir kullanım alanı sunar. Bu sebeple ekosistemin dönüşümünün korunması, sürdürülebilirliğin sağlanmasında temel etkidir. Ekosistemin yenilenme hızının, insanlığın tüketim hızının üzerinde tutabilmek gerekir.

Yeni yöntem ve ürünler ile sürdürülebilirliğe önemli katkılarda bulunmaktadır (Yavuz, 2010). Yenilikçi (**İnovatif**) yaklaşımlar, özellikle sorunlara karşı yaratıcı çözümler sunarak ve teknolojik gelişimleri etkin kullanarak sürdürülebilirliğe katkı sağlar.

**Verimliliğin** artırılması ile fayda oranı artarken diğer yandan çevresel zararlar da azalır. Verimliliğin geliştirilmesinde kaynakların kullanımı, yönetimi ve kalitesini de içeren yaklaşımlar sunulur (Rosen, 2009).

Sürdürülebilirliğin temel unsurlarından ekonomik, çevre ve sosyal boyutlar arasında sürekli bir etkileşimi göz önünde tutan bir dinamiktir. Bir boyutta ileri adımlar atılırken, diğer boyutlardaki adımların ihmal edilmesi, sürdürülebilirlikte denge dinamiğini göz ardı etmek olacaktır.

Sürdürülebilirlikte **etik değerler**, sorumlulukları ve toplumsal eşitliği sağlayan ve sürdüren demokratik bir unsurdur. Bu unsur sadece sosyal sorumluluk olarak değil, çevresel düzen ve ekonomik başarı boyutunda da sürdürülebilirlikte önemli bir dinamiktir. Yasaların toplum ve şirketler üzerindeki sade yaptırımını ötesinde, sürdürülebilirlikte destekleyici düzenlemelerin sağlanabilmesi açısından önem kazanır. Sosyal adalette, alım gücünün korunabilmesi önem taşır.

Sürdürülebilirlik kültürünün yaygınlaşması için önemli etmenlerdir. **Bilinçlenme ve sosyal kabul edilebilirlik** yaklaşımlarının yaşam tarzlarındaki düzenlemeler ile sürdürülebilirliğe katkıları artmaktadır.

Şirketlerin sürdürülebilirlik yaklaşımları, hem çalışanları hem de diğer paydaşları üzerinde yüksek katma değerli **güven ve motivasyon** unsurlarını yaratır. Günümüzde kurumsal itibarın oluşmasında sürdürülebilirlik doğrusal bir yaklaşım sağlar.

Yukarıda ele alınan sürdürülebilirlik dinamiklerinde görüleceği gibi, sürdürülebilirlikte geniş bir kavram haritası ortaya konmakta, bu da geniş uygulama alanları yaratmaktadır. Ancak, söz konusu dinamiklerin incelenmesinde bazı yanlış anlamalara açıklık getirmekte fayda var. Örneğin, sürdürülebilir enerjinin sadece yenilenebilir enerji olarak düşünülmesi, bunun yenilenebilir kaynakların kullanımı ile kısıtlı kalabilecek bir yaklaşım olur. Ayrıca, yenilenebilir kaynaklardan enerjinin üretiminde, depolanmasında ve kullanımında da –ömür devri özelliği– sürdürülebilirliğin ele alınması gerekir. Örneğin, günümüzde özellikle Hidroelektrik Santrallerin (HES), çevresel ve sosyo-ekonomik tahribatının ciddi boyutlarda olduğu değerlendirilmektedir. Bu açıdan, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan HES’lerin kurulum ve işletme aşamalarındaki etkileri, onu sürdürülebilirlikten uzak kılmaktadır (Atak & Öztok, 2013). Bu sebeple, sürdürülebilirliğin tüm boyutları ile topyekûn olarak değerlendirilmesi bir zarurettir – denge dinamiği.

Sürdürülebilirliğin tanımı, gelişimi ve dinamiklerinin ele alınması sonrasında öne çıkan uygulama alanlarından birinin, enerjinin sürdürülebilirliğinin olduğu görülmektedir. Enerjinin yaygın kullanımı, ekonomik kalkınma ve yaşam standartlarındaki önemi ve çevreye olan etkileri açısından enerjinin sürdürülebilirliği, diğer sürdürülebilirlik alanlarından daha büyük önem taşır. Enerjinin verimli kullanımında, enerjinin termodinamik yasaları ile nitelendirilmesi önem arz eder. Birinci kanun enerjinin korunumu, ikincisi de enerjinin kalitesi ile ilgili olup, entropi ve ekserji konseptlerini kapsar. Verimliliğin

artırılması termodinamiğin ikinci yasasında ortaya çıkan ekserji kavramı ile ele alınmaktadır (Rosen, 2009).

### **Binaların ısıtma sistemlerinde yapılan sürdürülebilir yaklaşım nedir?**

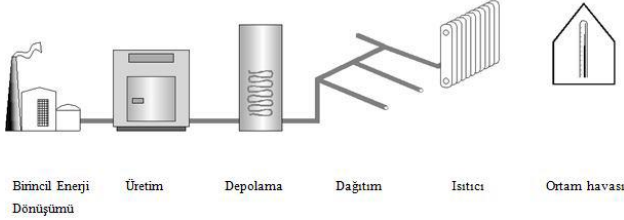
Enerji kaynaklarının verimli kullanımı, ısı sistemleri açısından son derece önemlidir. Bu kapsamda termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarından enerji kaynaklarının (petrol, doğal gaz, kömür vb.) etkin kullanımını sağlayacak şekilde yararlanılmaktadır. Bir ısı sistemine giren enerji farklı biçimlerde olabilir. Örnek olarak yakıt, elektrik veya madde akışı verilebilir. Termodinamiğin birinci kanununa göre enerji yok edilemez. Hâlbuki enerjinin bir bölümü kullanılamaz haldedir. Bu bölüm birinci kanun ile değil, ekserji kavramı ile açıklanabilir. Termodinamiğin ikinci kanunu enerjinin kullanılabilirliği hakkında bilgi vermektedir. Ekserji, enerji kalitesinin bir ölçüsüdür. 1 kJ elektrik ve 1 kJ ısı enerjisi eşit iş potansiyeline sahip değildirler. Ekserji, ortam şartları dikkate alınarak elde edilebilecek en yüksek iş potansiyelidir. Enerji kayıplarının yerini, nedenini ve büyüklüğünü doğru bir şekilde ifade eder.

Ekserji analizi ısı sistemlerinin sürdürülebilirlik performansının değerlendirilmesinde uygun bir araçtır. Söz konusu analiz ortam şartlarını da dikkate alarak enerjinin kullanılabilir kısmına odaklandığı için gerçekçi bir sürdürülebilirlik incelemesine imkân verir.

### **Ekserji Analizinin Isıtma Sistemine Uygulanması**

Ekserji analizi yönteminde termodinamiğin ikinci kanunu ile kütle ve enerjinin korunumu ilkeleri de uygulanmaktadır. Bir sisteme giren ve çıkan enerji akımlarının entalpi değerleri tamamen kullanılabilir değildirler. Tersinmezliklerin belirlenebilmesi için ortam şartları kullanılır. Tersinmezliklerin nedenlerine örnek olarak, sürtünme, dengesiz genişleme, iki akışın karışması, sonlu sıcaklık farkında ısı geçişi verilebilir.

Bina ısıtma sistemlerine ekserji analizi uygulanması için öncelikle binanın sınır koşulları belirlenir. Bunlar iç ortam sıcaklığı, dış ortam sıcaklığı, bina iç hacmi ve bina oturma alanıdır. Genel olarak bir binanın ısıtma sistemi basamakları Şekil 1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 1. Bina ısıtma sistemi basamakları.

Bu çalışmada ısıtma sistemi üretim, dağıtım, ısıtıcı, iç ortam havası ve ısının binayı terk ettiği bina kabuğu basamaklarından oluşmaktadır. Üretim basamağında kazan, dağıtım sisteminde borular ve ısıtıcı basamağında radyatörler dikkate alınmıştır.

Isıtma sisteminin her bir basamağına gelen ısı enerji akımları ısı ihtiyacı belirlendikten sonra hesaplanır. Isıtma ihtiyacı aynı zamanda iç ortam havasını belirlenen sıcaklıkta tutabilmek için gereken ısı miktarıdır. Isıtıcı basamağındaki ısı akımı, ısı ihtiyacına ısıtıcı basamağındaki ısı kaybı akımı eklenerek bulunur.

$$\dot{Q}_{ısıtıcı} = \dot{Q}_{ihtiyaç} + \dot{Q}_{kayıla,ısıtıcı} \quad (1)$$

Benzer şekilde tüm basamaklardaki ısı değerler elde edilir. Bir ısıtma sisteminde incelenen enerji akımı için kinetik ve potansiyel enerjilerdeki değişim çok az olduğundan ihmal edilebilir. Tersinmezlikler ise verim tanımı yapıldıktan sonra elde edilmektedir. Isıtma sisteminde bir basamağın ekserji akımı ısı ekserji bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

$$\dot{E}x_{Q,i} = \dot{Q}_i \cdot \left[ 1 - \frac{T_0}{T_i} \right] \quad (2)$$

Burada  $\dot{Q}$  ısıtma sistemi basamağının ısı akımını belirtmektedir. Eşitlik 2’deki diğer çarpan kısmı ise Carnot verimidir. Isıl enerjinin ne kadarının ısı ekserjiye dönüştürülebildiğinin bir ölçüsüdür.

Analiz sırasında, bina ısıtma sistemi basamaklarına gelen ekserji akımları bulunur. Isıl ekserji akımları ve ekserji kaybı akımları hesaplanır. Bina kabuğundan sonra ekserji akımı sıfır değerini almaktadır.

### Ekserjetik Sürdürülebilirlik Parametreleri

Ekserji analizi tamamlandıktan sonra elde edilen ekserji akımları ekserjetik sürdürülebilirlik parametrelerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri arasında ekserji verimi, atık ekserji oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi sayılabilir. Bu parametreler Midilli ve Dinçer (2009) tarafından tanımlanmıştır.

Ekserji Verimi (EV), ekserji analizinde elde edilen en önemli parametrelerden biridir. Farklı tanımlamalar yapılmakla beraber genellikle maksadımız olan ekserji akımı değerinin giren ekserji akımı değerine oranı olarak ifade edilmektedir.

$$EV = \frac{Ex_{kul}}{\dot{E}x_{giren}} \quad (3)$$

Isıtma sistemi için her basamakta giren ekserji akım değeri ve o basamakta kullanılan ekserji akımı değerleri dikkate alınmıştır.

Atık Ekserji Oranı (AEO), bir sistemden atılan ekserjinin sisteme giren ekserjiye oranı olarak tanımlanmaktadır. Isıtma sistemindeki atık ekserji, ilgili basamaktaki ısı kaybı olarak kabul edilmiştir.

$$AEO = \frac{\dot{E}x_{yıkı} + \dot{E}x_{kayıla}}{\dot{E}x_{giren}} \quad (4)$$

Çevresel Etki Faktörü (ÇEF), atık ekserji oranının ekserji verimine oranı olarak ifade edilmektedir.

$$\zeta_{EF} = \frac{AEO}{EV} \quad (5)$$

Ekserjetik Sürdürülebilirlik Endeksi (ESE), çevresel etki faktörünün çarpmaya göre tersi alınarak bulunur. Düşük çevresel etki yüksek sürdürülebilirlik anlamına gelmektedir.

$$ESE = \frac{1}{\zeta_{EF}} \quad (6)$$

## Uygulama ve Başarımlar

Bu çalışmada bir binanın ısıtma sistemindeki ısı kayıpları, ekserji analizi yöntemiyle çalışılmıştır. Binanın sınır koşulları Tablo 2’de sunulmuştur.

**Tablo 2.** Bina sınır koşulları

Veriler	Değerler
Binanın iç hacmi (m <sup>3</sup> )	86667,6
Net döşeme alanı (m <sup>2</sup> )	7222,3
İç ortam sıcaklığı (°C)	20
Dış ortam sıcaklığı (°C)	0

Anaiz edilen ısıtma sisteminde sıcak su kazanlarında kullanılan dizel yakıtın kimyasal ekserjisi ısı ekserjiye dönüşmektedir. Suya aktarılan ekserji dağıtım hattında yer alan borular vasıtasıyla binanın çeşitli bölgelerine ulaşmaktadır. Isıtıcı olarak kullanılan fan coil sistemi ortam havasını ısıtmaktadır.

Sisteme ilişkin ekserji akımları ve ekserji kaybı akımları Yucer ve Hepbaşlı (2012)’dan uyarlanmış olup Tablo 3’te görülmektedir.

**Tablo 3.** Isıtma sisteminin ekserji analizi sonuçları

Basamak	Ekserji Akımı (kW)	Ekserji Kaybı Akımı (kW)
Üretim	1152,35	987,57
Dağıtım	164,78	49,06
Isıtıcı	115,72	6
İç Ortam Havası	109,72	66,54
Bina Kabuğu	43,18	43,18

Ekserji analizi sonuçları incelendiğinde; üretim basamağında en yüksek ekserji kaybının

meydana geldiği görülmektedir. Yakıtın kimyasal ekserjisi yanma işlemi sonrası tersinmezlikler nedeniyle ısıtıcı akışkana düşük oranda transfer edilmektedir. Üretim basamağındaki ekserjinin %85,7’si kaybedilmiş ve ancak 164,78 kW ekserji akımı dağıtım basamağına aktarılmıştır. Dağıtım basamağına giren ekserji akımının %70,2’si ısıtıcıya transfer edilmiştir. En düşük ekserji kaybı ısıtıcı basamağında olmuştur. Isıtıcıdan geçen akışkanın ekserjisinin yaklaşık %95’i iç ortam havasına aktarılmıştır. Bina kabuğundan 43,18 kW ekserji dış ortama geçmiş ve ekserji değeri sıfır olmuştur.

Ekserji analizi sonuçları kullanılarak ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri hesaplanmıştır. Yalçın (2016) bir evin enerji sisteminin ekserjetik sürdürülebilirlik analizini yapmıştır. Çalışma incelendiğinde fosil enerji kullanan evin çevresel etki faktörü 3,56, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0,28 iken, yenilenebilir enerji kullanan evin çevresel etki faktörü 1,25, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ise 0,8 olarak hesaplanmıştır.

Stougie ve diğ. (2018) fosil ve yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel, ekonomik ve sürdürülebilirlik değerlendirmelerini yapmışlardır. Toplam kümülatif ekserji kaybı yöntemi uygulanmıştır. Güç santrali, biyoyakıt, rüzgar ve güneş enerji kaynakları incelenmiştir. Rüzgar ve güneşin atık ekserji oranları en düşük seviyelerde çıkmıştır. Güç santrali ve biyoyakıtın çevresel etkileri yüksek bulunmuştur.

Bu çalışmada sürdürülebilirlik değerlendirmesi için bulunan parametreler Tablo.4’te görülmektedir.

**Tablo 4.** Hesaplanan ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri

Isıtma Sistemi Basamakları	EV	AEO	ÇEF	ESE
Üretim	0,143	0,857	5,993	0,167
Dağıtım	0,702	0,298	0,424	2,359
Isıtıcı	0,948	0,052	0,055	18,287
İç ortam havası	0,394	0,606	1,541	0,649



Bina kabuğundan ekserji akımının tamamı dışarı atıldığı için sürdürülebilirlik parametreleri açısından değerlendirmeye alınmamıştır. En düşük ekserji verimi üretim basamağında elde edilmiştir. Bunun sonucunda atık ekserji oranı ise 0,857 ile en yüksek değer olmuştur. Çevresel etki faktörü açısından ise yine üretim basamağı 5,993 ile en yüksek olarak bulunmuştur. Sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde; ısıtıcı basamağı 18,287 ile en yüksek değere sahiptir. Ayrıca ekserji verimi 0,948 ve atık ekserji oranı 0,052 elde edilmiştir. İlk ele alınması gereken kısım üretim basamağı yani ısı enerjisinin temin edildiği kazandır. Radyatörlerden olan ısı kaybı nedeniyle meydana gelen çevresel etki faktörü oldukça düşük olup 0,055 olarak bulunmuştur.

Yakın dönemde ekserji analizi ve sürdürülebilirlik parametreleri kullanılarak yapılan çalışmalar incelendiğinde; Bangladeş'in kırsal bölgesindeki yerleşimin ısıtma sistemlerinin ekserji ve sürdürülebilirlik analizi incelendiğinde ekserji verimi değerleri %4,86 ile %8,42 aralığında bulunmuştur (Chowdhury ve diğ. 2019). AEO ve ESE değerleri de hesaplanmıştır.

Sayadi ve diğ. (2019) bina ısıtma sistemini inceleyerek enerji performansı ile bütün ekserji sonuçlarını dikkate almışlardır. Ekserji verimi sonuçları tüm yıl boyunca hesaplanmış ve %0,91 ile %6,94 aralığında bulunmuştur. Kullanılan kazan ve ısıtıcıların ekserji verimleri incelenmiş, sırasıyla Kazan 1, Kazan 2 ve Isıtıcı için 22,31 , 22,91 ve 57,59 bulunmuştur.

Gojak ve Bajc (2019) konut ısıtmasında kullanılan farklı enerji kaynaklarını incelemişlerdir. ÇEF ve ESE değerleri hesaplanmıştır. En yüksek EV %6 olarak bulunmuştur.

Yapılan çalışmalarda elde edilen parametre sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 5.** Hesaplanan ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri

Yayımlar	EV (%)	AEO	ÇEF	ESE
Midilli ve Dinçer (2009)	0,29-0,56	0,44-0,57		

Chowdhury ve diğ. (2019)	4,86-8,42	0,79-0,93		
Sayadi ve diğ. (2019)	0,91-6,94			
Gojak ve Bajc (2019)	6	15,37-50	0,065-0,028	

## Sonuçlar

Bu çalışmada bir bina ısıtma sisteminin basamakları ekserji analizi yöntemiyle incelenerek her basamağın sürdürülebilirlik potansiyelleri üzerinde durulmuştur.

Bina sınır koşulları dikkate alınarak tüm basamaklar arasındaki ısı ekserji akımları ve ekserji kayıpları bulunmuştur. Daha sonra elde edilen bulgular yardımıyla ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri hesaplanmıştır. Dikkate değer sonuçlar aşağıda verilmiştir;

a) Ekserji analizi sonuçlarına göre en yüksek ekserji kaybı üretim basamağında gözlenmiştir. 987,57 kW olarak bulunmuştur.

b) Ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri göstermiştir ki en düşük atık ekserji oranı ve çevresel etki faktörü ısıtıcı basamağında elde edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek ekserji verimi ve ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi de ısıtıcıya aittir. Bu değerler sırasıyla %5,2, 0,055, %94,8 ve 18,287 olarak hesaplanmıştır.

c) Ekserji kayıpları değerleri incelendiğinde en düşükten en yükseğe doğru sıralama şu şekildedir: ısıtıcı, dağıtım, iç ortam havası ve üretim basamakları. Hesaplanan ekserji kayıpları 6kW, 49,06kW, 66,54 kW ve 987,57 kW'tır.

ç) Ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri dikkate alındığında, en yüksek EV değeri ısıtıcıya aittir. Onu takip edenler sırasıyla dağıtım, iç ortam havası ve üretim basamaklarıdır.

d) En yüksek AEO ve ÇEF değerleri üretim basamağında gözlenmiş olup 0,857 ve 5,993 olarak hesaplanmıştır.

e) ESE değerlerine bakıldığında en iyi performansa 18,287 ile ısıtıcı sahiptir.

f) Üretim basamağı sürdürülebilirlik açısından en kötü bileşendir. Öncelikle bu bileşenin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. İleriye dönük araştırma konusu olarak ısı sistem sürdürülebilirlik performanslarının optimizasyonu planlanmaktadır.

## Kaynaklar

- Atak, E., & Öztok, D. WWF-Türkiye. 10 Soruda Hidroelektrik Santraller. [www.wwf.org.tr](http://www.wwf.org.tr) (20.10.2018).
- Borsa İstanbul, Şirketler İçin Sürdürülebilirlik Rehberi. İstanbul: İMKB, 2014.
- Chowdhury, H., Chowdhury, T., Chowdhury, P., Islam M., Saidur R., Sait S.M., Integrating Sustainability Analysis with Sectoral Exergy Analysis: A Case Study of Rural Residential Sector of Bangladesh, *Energy and Buildings* 202, 109397, 2019.
- Elkington, J., *Enter The Triple Bottom Line*. "Enhttp://www.johnelkington.com/archive/TBL-elkington-chapter.pdf. (25.10.2018)
- Gojak M., Bajc T., Thermodynamic Sustainability Assessment for Heating of Residential Building, *E3S Web of Conferences* 111 CLIMA 2019, 04028, 2019.
- Gönel, F.D., Globalleşen Dünyada (Nasıl Bir) Sürdürülebilir Kalkınma. Feride Doğaner Gönel, "http://www.yildiz.edu.tr/~gonel/akademikdosyalar/yayinlar/globallesendunya. (30.10.2018)
- Hitchcock, D., & Marsha Willard., *The Business Guide to Sustainability: Practical Strategies and Tools for Organizations*. Earthscan Publishing. 2006.
- Midilli A., Dinçer I., Development of some exergetic parameters for PEM fuel cells for measuring environmental impact and sustainability, *International Journal Of Hydrogen Energy* 34, 3858-3872, 2009.
- Montgomery, S. L., *Küresel Enerjiye Yön Veren Güçler: 21. Yüzyıl ve Sonrası*. TÜBİTAK. 2014
- Our Common Future, Brundtland Report. Oxford University Press, 1987.
- Rosen, M. A., *Energy Sustainability: A Pragmatic Approach and Illustrations*. *Sustainability* 1(1), 55-80, 2009.
- Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T., Dynamic Exergetic Assessment of Heating and Cooling Systems in a Complex Building, 561-576, 2019.
- Stougie L., Giustozzi N., Van der Kooi H., Stoppato A., Environmental, Economic and Exergetic Sustainability Assessment Of Power Generation From Fossil and Renewable Energy Sources, *International Journal of Energy Research* 42, 2916-2926, 2018.
- Şirketlerin 2014 Planları, *Sürdürülebilirlik Dergisi - Sustainable Business*, 2013.
- Yalçın S., *Yenilenebilir Enerji Kullanan Bir Evin Ekserjetik Sürdürülebilirlik Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, 2012.
- Yavuz, V. A., *Sürdürülebilirlik Kavramı ve İşletmeler Açısından Sürdürülebilir Üretim Stratejileri*, Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 7(14), 63-86, 2010.
- Yucer C.T., Hepbaslı A., Exergoeconomic analysis of a heating center from the generation stage to the envelope of the building, *Energy and Buildings* 47, 592-599, 2012.

## **Sustainability Concept and Exergy Analysis: An Application for Building Heating Systems**

### **Extended abstract**

*In the approach to sustainability, it is essential to consider the needs of future generations in meeting today's needs. Sustainability is becoming a socially accepted concept as well as finding different application areas in today's point of view. Sustainability concept has a 40 years history, but currently it is expressed as sustainable development more frequently. One of the issues addressed in the context of sustainable energy applications is the concept of exergy. This concept come into prominence especially in energy based service applications like heating, lighting etc. In this study, sustainability term is explained and important factors affecting sustainability were mentioned. Sustainable energy applications are widely experienced within sustainability issues. As an application area, a building heating system was investigated.*

*To apply exergy analysis to a building heating system, firstly the boundary conditions are determined. These include indoor temperature, outdoor temperature, volume and floor area of the building. Predesign sheet for an optimised building design is used. The heating system consists of stages. These are generation, distribution, heater and room air. Generation stage stands for the boiler equipment. The pipeline forms the distribution stage. The pipes carry the hot water to the heating equipment in rooms. Heater stage contains the heating equipment as fan coils. The room stage is for the room air.*

*The exergy analysis is based on second law of thermodynamics. The enthalpy of a system can not be converted into work totally. There are irreversibilities. These are due to some situations, namely friction, unbalanced expansion, mix of two flows, heat transfer at finite temperature difference etc. Kinetic and potential exergy values in the heating system components are neglected and assumed to be zero. Irreversibilities are considered in the calculations by defining the efficiencies. Heat losses in the heating system are calculated in exergy rates. The losses in every stage are investigated to obtain the performance parameters.*

*The sustainability performance of each stage is investigated by using four exergetic sustainability indicators. These are exergy efficiency, waste exergy ratio, environmental effect factor and exergetic sustainability index. Exergy efficiency (EE) is one of the most important factors that investigates the ratio between the availabilities of our purpose of energy and the input energy. Waste exergy ratio (WER) is defined as the ratio between the waste exergy and the input exergy. In the heating systems, the waste exergy represents the heat losses that can not be recovered. Environmental effect factor (EEF) is an important indicator. It investigates the environmental damage that the heating system causes because of the waste exergy output. Exergetic sustainability index (ESI) is defined as the inverse of the environmental effect factor.*

*The maximum exergy input rate, the maximum and minimum exergy loss rates were calculated. The best sustainability performance of stages were analyzed by obtaining the exergetic sustainability indicators. The best sustainability performances were identified for distribution stage for all of the four sustainability indicators. According to the exergy analysis, the worst component was generation stage. The highest exergy loss was observed in the boiler. It should be improved to make the heating system more efficient and sustainable.*

**Keywords:** Exergy, Sustainability, Energy Efficiency, Heating System.



## Investigation of wear behavior of Ti-6Al-4V and AISI 316 L biomaterials with ball on disc test device

Harun AKKUŞ<sup>1,\*</sup>, Tahsin KAMIŞ<sup>2</sup>, Hayrettin DÜZCÜKOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Technical Sciences Vocational School, Amasya University, Amasya, Turkey, ORCID iD: 0000-0002-9033-309X

<sup>2</sup> Technology Faculty, Selçuk University, Konya, Turkey, ORCID iD: 0000-0003-2894-1809

<sup>3</sup> Technology Faculty, Selçuk University, Konya, Turkey, ORCID iD: 0000-0002-7016-6888

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 7 September 2019

Received in revised form

9 December 2019

Accepted 27 January 2020

Available online 15 June 2020

#### Keywords:

Biomaterials, Ti-6Al-4V, AISI 316 L, coating, wear, temperature, SEM, ball on disc

### ABSTRACT

Ti-6Al-4V material is generally used in biomaterial applications. However, this material is difficult to supply and an expensive material. Instead of Ti-6Al-4V material; It is investigated whether the use of 316 L material as an alternative is easier and more economical. In this study, Ti-6Al-4V and AISI 316 L test specimens made of the material subjected to the test under the same conditions wear performance were investigated using the ball on disc experimental setup. The experiments were carried out in three replicates in a dry and liquid medium. As a result, in the experiments; AISI 316 L samples are coated with PVD method compared to other samples in wear rates and abrasive wear marks on the surface of the samples were found to decrease. In studies using sodium hyaluronate fluid, it was found that the rate of abrasion and wear traces decreased compared to the dry environment. It was determined that 316 L samples coated with PVD method showed better wear performance compared to uncoated Ti-6Al-4V material. Considering the density differences of Ti6Al4V and 316L materials, 316L can be used instead of Ti6Al4V material.

Doi: 10.24012/dumf.630224

## Introduction

Due to their crystal structure and strong metallic bonds, metal and metal alloys with superior mechanical properties are used as biomaterials. It is used as a joint prosthesis and bone replacement material in orthopedic applications, while it is also used as an artificial heart, catheter, valve, heart valve in face and jaw surgery, such as an implant, or in cardiovascular surgery [1]. In order to use the metals as biomaterials, factors such as compatibility with tissues, wear and corrosion behaviors, surface properties, side effects and cost are investigated [2].

Wear and corrosion are an important problem in biomaterials. It is not possible to completely eliminate this problem. The aim is to slow down the speed of this damage mechanism [3]. In recent years, surface coating processes have

increased interest in increasing the tribological properties of 316 L stainless steel and Ti-6Al-4V alloy used as biomaterials [4-7].

Some researchers have described the term biocompatibility as surface and structural compatibility. Surface compatibility is that a biomaterial is physically, chemically and biologically compatible with body tissues. Structural compatibility is the optimum fit of the material to the mechanical behavior of body tissues [8, 9]. The biocompatibility of metal prostheses is related to their corrosion in the body (in vivo) [10].

Ti-6Al-4V is a titanium alloy which is the raw material of most of the implants used in the field of medical orthopedics and neurosurgery. It is preferred for Ti-6Al-4V implant production because it is more resistant to corrosion than stainless steel in pure uncoated condition,

\* Corresponding author

Harun AKKUŞ

✉ e-mail harunakkus@windowslive.com

because of its flexibility and compatibility with human body [11-13].

316 L stainless steel material is used as an implant because of its high resistance to intergranular and stressed corrosion cracking. This material was used as test material for the purpose of improving the resistance properties due to the inability to apply hardening with normal heat treatment applications [14-18].

Biomaterials should not be reduced while corrosion resistance is improved while coating high corrosion resistance that makes these materials superior [19, 20].

In this study, test samples made of Ti-6Al-4V and AISI 316 L materials were tested under the same conditions and their wear performances were investigated by ball on disc test setup.

## Material and Method

### Purpose of experimental study

In our study, we aim to investigate the wear behavior of AISI 316 L stainless steel material which is more advantageous in terms of ease of procurement, and easier to process, which can eliminate these disadvantages in comparison to the disadvantages of Ti-6Al-4V material supply and economically high costs.

The parameter values we have determined in our study are given in Table 1.

**Table 1.** Experimental conditions.

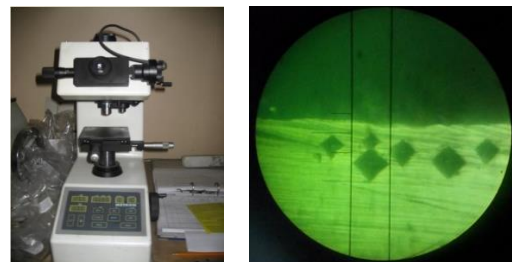
Experimental conditions	Definitions
Experiment device	Ball on disc
Experiment materials	AISI 316 L, Ti-6Al-4V, Nitrided AISI 316 L, TiN coated AISI 316 L, CrN / TiN coated AISI 316 L
Experiment speeds (m/s)	1-1,5-2
Experiment force (N)	7,5-10
Experiment distance (m)	500
Experiment medium	Dry-Liquid (Sodyum hyaluronat)
Experiment ball diameter (mm)	10
Experiment ball material	100Cr6

Experiment measurements	Wear rate, Temperature change, SEM images
-------------------------	---

The discs to be used in the experiments were subjected to the required measurements and polishing was carried out using 200-400-600-1000 grains. Samples whose polishing was completed were subjected to plasma nitration process. The test samples were subjected to plasma nitration for 12 hours at a temperature of 600 °C in 40% nitrogen and 60% ammonia medium. Plasma nitration process was applied to the parts using 1000 grit sandpaper. After polishing, one of the discs was coated with TiN by applying 450 °C temperature and 10<sup>-5</sup> Torr vacuum, and one was coated with CrN/TiN by applying 475 °C temperature and 10<sup>-5</sup> Torr vacuum.

### Hardness measurements

Hardness measurements of PVD coated and uncoated discs made of plasma nitration were performed in Mht-2 micro hardness tester as shown in Figure 1. Microhardness measurements were measured as HV by applying a 100 g load for 15 seconds with a diamond tip. The hardness values measured in Table 2 are given.



**Figure 1.** Mht-2 microhardness measuring devices.

**Table 2.** The measured hardness values.

Material	Hardness value
AISI 316 L	320 HV <sub>1</sub>
Ti-6Al-4V	350 HV <sub>1</sub>
Nitrided 316L	1014 HV <sub>0,1</sub>
TiN coated 316 L	2500 HV <sub>0,1</sub>
CrN/TiN coated 316 L	2850 HV <sub>0,1</sub>
Ball	64-66 HRC

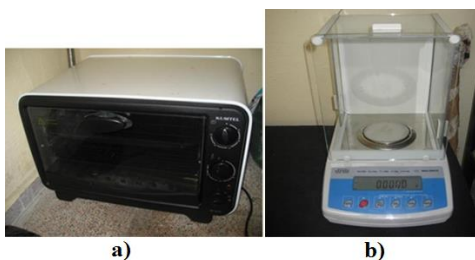
The PVD coated disc was cut as shown in Figure 2 to measure the thickness of the samples.



**Figure 2.** Example of disc cut to measure thickness.

#### *Preparation of samples for the experiment*

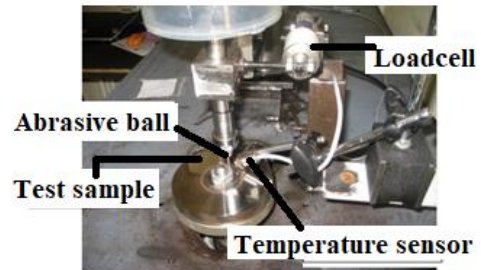
After the test samples and abrasive balls were cleaned with ethanol, they were dried for 15 minutes in the drying oven as shown in Figure 3 and pre-test weights were determined with a  $10^{-4}$  g weight scale. The weighed samples were subjected to abrasion in the ball-disc test apparatus under dry and sodium hyaluronate fluid conditions. After the test, the samples were cleaned and weighed by ethanol and the wear losses were determined. Wear rates were calculated depending on the wear losses. Wear tests were carried out at room temperature and under normal atmosphere. The abrasion marks on the disc were examined at 100x, 250x and 400x magnification. All experiments were repeated three times and averaged.



**Figure 3.** a) Drying oven, b) Weighing machine.

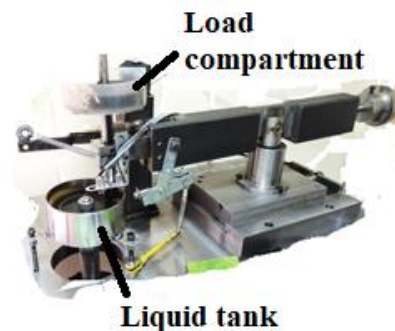
The ball on disc test device is driven by a 2.2 kW and 1400 rpm motor and the disc is rotated. The device consists of a 2.2 kW AC motor, 2.2 kW speed adjuster, a disk, support arm, clamp mechanism, table, slide mechanism, weighting apparatus, variable weights, load cell data transfer card. Squirrel data logger with versatile, general purpose, 8 analog inputs is used for

friction coefficient and temperature measurement. Using the Squirrel View interface program, 10 values are read and recorded per second. Figure 4 shows the ball-disc test device.



**Figure 4.** Ball on disc test device.

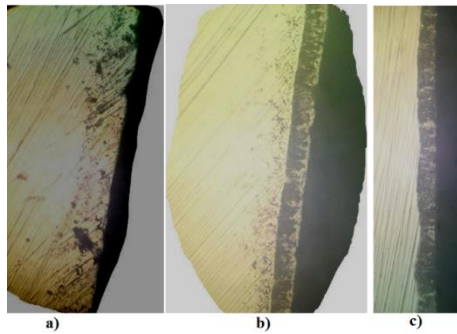
After the work in dry environment was finished, 0.5 liters of sodium hyaluronate liquid was added to the system by adding the tank seen in Figure 5 and the experiments in the liquid medium were also carried out.



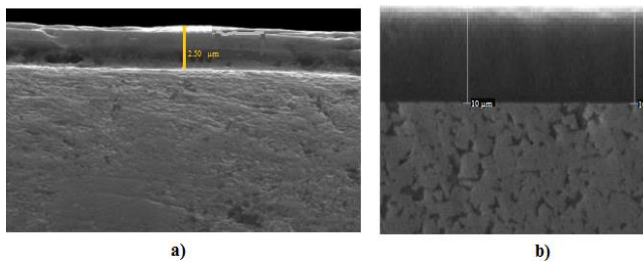
**Figure 5.** Ball-disc test device; Working with sodium hyaluronate fluid.

#### *Scanning Electron Microscope (SEM) images*

Appropriate samples were cut in the cutting machine to take images from the section and measure the thickness of the coating. The surfaces of the horizontal sander were cleaned and etched with pure alcohol and then examined by a metal microscope at a magnification of 600X (Figure 6). Then, images and coating thicknesses from the section were made by SEM. In Figure 6, the hardness thicknesses were found to be 10  $\mu\text{m}$  on the nitrided disc, 2.5  $\mu\text{m}$  on the TiN coated disc and 4  $\mu\text{m}$  on the CrN/TiN coated disc.



**Figure 6.** SEM image a) TiN coated, b) Nitrided, c) CrN/TiN coated.



**Figure 7.** SEM image a) TiN coated, b) Nitrided, c) CrN/TiN coated.

## Experimental Results

### *Wear quantities for ball and disc*

Table 3 shows the wear rates on discs that are subject to wear with a 100Cr6 bearing ball. When we examine the table, it is seen that the highest abrasion rate in the uncoated 316 L sample was the highest abrasion rate. The highest hardness value of CrN/TiN coated 316 L sample was observed. When we examine Table 3, it is seen that the highest abrasion value of the

most abrasion was observed in the uncoated 316 L sample with the lowest hardness value (320 HV), and the highest hardness value of CrN/TiN coated 316 L sample was observed. Again in nitrided and TiN coated samples, it is seen that the abrasions are very low compared to both the uncoated 316 L and the uncoated Ti-6Al-4V material. The reason for the improvement of the abrasion resistance is the formation of many hard phases together with the coating, the reduction of the particle size, the high dislocation density and the interlocking of the dislocations [21]. When the amount of abrasion in the coated samples is examined, it is seen that, according to the uncoated 316 L sample, approximately 50% less wear is observed in the nitrided samples, 70% in the TiN coated samples and 85% in the CrN/TiN coated samples. Again, compared to the uncoated Ti-6Al-4V sample, it is seen that the nitrided 316 L sample provides about 18% -20%, the TiN-coated 316 L sample gives about 35% -40% and the CrN/TiN coated sample gives about 60-65% advantage. Table 3 shows that the amount of wear occurring on the discs is between 20% and 50% lower than the dry environment.

The highest abrasion rate is seen in the uncoated 316 L samples in the coated samples with the thickness of the coating is observed to decrease the wear rate. This reduction in the wear rate can be explained by the resistance of the hard layer against abrasion. Again, the increase of the coating thickness interlocked with the hard layers and reduced the wear resistance, which resulted in the lowest wear rate of CrN/TiN coating [16].

**Table 3.** For disk; shear rate and abrasion rates according to the applied force. [Wear rate  $\times 10^{-6}$  ( $\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ )].

Experimental samples	1 m/s		1,5 m/s				2 m/s					
	7,5 N		10 N		7,5 N		7,5 N		10 N		7,5 N	
	Dry	Liquid	Dry	Liquid	Dry	Liquid	Dry	Liquid	Dry	Liquid	Dry	Liquid
AISI 316 L	33	25	36	29	35	28	38	30	38	32	40	30
Ti-6Al-4V	23	17	27	22	20	15	21	17	20	15	22	16
Nitrided 316L	14	10	15	11	10	7	11	8	10	8	10	9
TiN coated 316 L	10	7	12	8	9	5	10	6	8	6	9	7
CrN / TiN coated 316 L	7	4	8	4	7	2	8	3	4	2	6	2

As the effect of the force is increased in Table 4, the abrasion rate in the ball increases for all shear speeds and for all discs. This is due to the increase of the load and the increase of the contact surface of the two materials. The wear rate increased steadily with the uncoated 316 L sample as the slip speed increased, but increased for a while, but then decreased for other samples. This is due to the fact that the materials with high chemical stability do not adhere to the surface of the abraded material and have a lubricity characteristic. The highest abrasion on the ball is the highest measured (2850 HV) CrN/TiN coating, and as the hardness of the discs, the amount of wear on the ball decreases. Again in the same table, the

amount of abrasion in all tests has decreased with the effect of film formed by liquid. It is seen that the liquid has an advantage between 25% and 35% in terms of the amount of wear of the ball.

It is seen that the abrasion rate increases as the abrasion force increases in all coatings. It is seen that the coated discs are more erosive than the uncoated discs and the most abrasion is carried out by the CrN / TiN coated 316 L sample. This is believed to result from increased surface hardness of the discs. It is seen that sodium hyaluronate fluid added to the medium reduces the wear rate on the balls according to the dry environment due to the film layer formed between the disc and the ball.

**Table 4.** For ball; shear rate and abrasion rates according to the applied force. [Wear rate X 10<sup>-6</sup> (mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>)].

Experimental samples	1 m/s				1,5 m/s				2 m/s			
	7,5 N		10 N		7,5 N		10 N		7,5 N		10 N	
	Dry	Liquid	Dry	Liquid	Dry	Liquid	Dry	Liquid	Dry	Liquid	Dry	Liquid
AISI 316 L	4	3	7	5	4	3	5	3	2	1	3	1
Ti-6Al-4V	5	4	8	6	5	3	6	4	3	2	3	2
Nitrided 316L	8	6	10	7	6	5	8	5	6	5	6	4
TiN coated 316 L	11	8	12	9	8	5	9	5	8	6	10	7
CrN/TiN coated 316 L	14	10	16	12	9	7	12	10	11	9	13	10

#### *Examination of temperature change*

The temperature values recorded by the computer system and measured instantly by the help of sensors in the ball on disc system were compared according to the sliding distance.

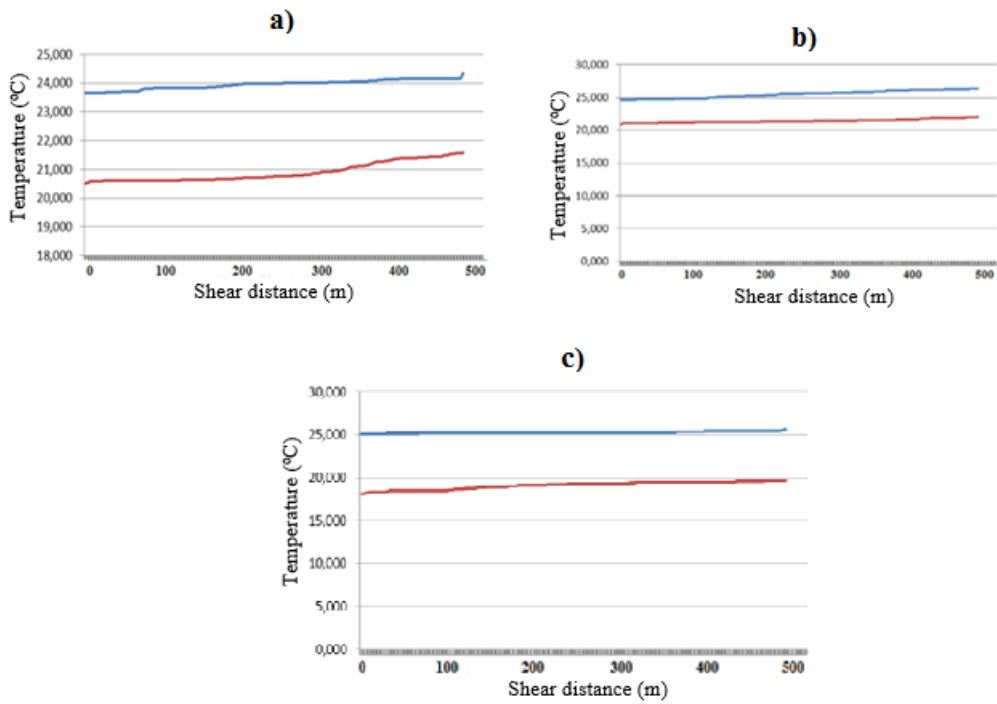
For the shear rate of 1 m/s in Figure 8, for the shear rate of 1.5 m/s in Figure 9 and for the shear rate of 2 m/s in Figure 10; The effects of the coatings on the dry and liquid medium temperature are shown under 7.5 N load. It is observed that the surface temperature decreases with the coatings. This is related to reduced surface roughness and reduced abrasive wear resulting in reduced particles. In addition, the temperature distribution of TiN coatings has also been found to reduce the temperature.

Average temperature for the shear rate of 1 m/s; in uncoated 316 L sample, dry medium 27,15 °C, in liquid medium 21,25 °C, in nitrated 316 L sample, in dry medium 25,3 °C, in liquid

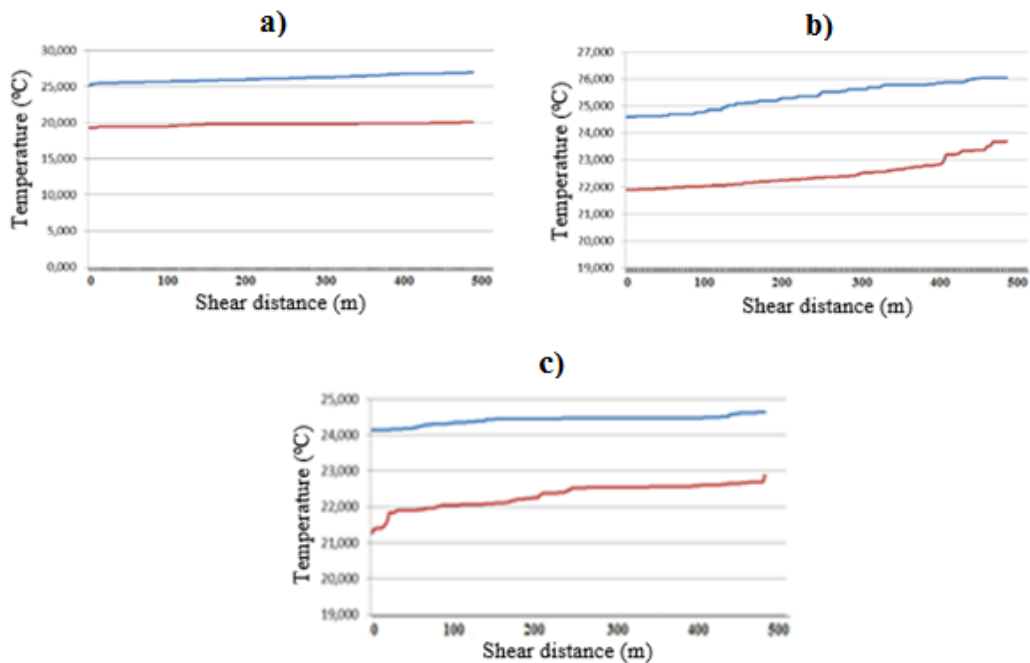
medium 20,85 °C and in CrN/TiN coated 316 L sample in dry medium 24,10 °C in liquid medium and 20,65 °C. In the light of this information, the temperature of CrN/TiN coating was found to decrease by 11%, while sodium hyaluronate fluid added to the environment decreased the temperature by 18% -22%.

Average temperature for the shear rate of 1.5 m/s; Uncoated 316 L sample, dry medium 26,15 °C, liquid medium 20,10 °C, nitrated 316 L sample, dry medium 25,45 °C, liquid medium 23,15 °C and CrN/TiN coated 316 L sample, dry medium 24, 35 °C and 23,45 °C in liquid medium. In the light of this information, it is seen that CrN/TiN coating reduces the temperature by 9% and the addition of sodium hyaluronate liquid by 15-20%.

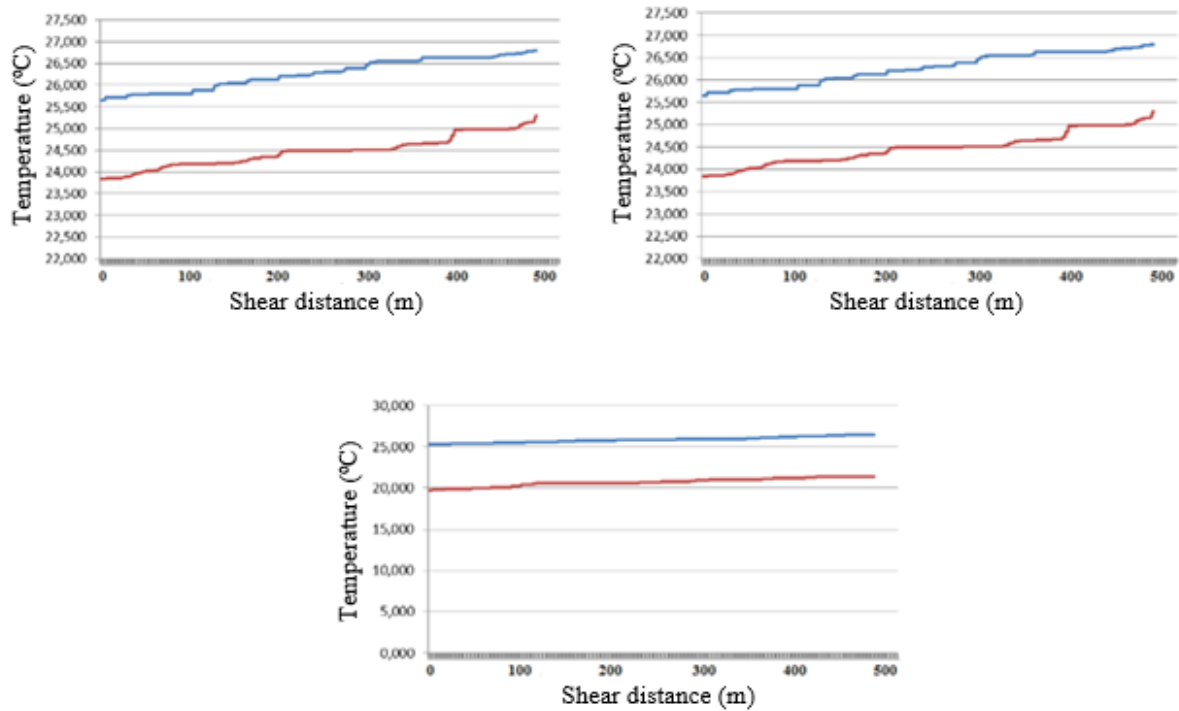




**Figure 8.** Effect of the sliding distance on the dry and liquid wear environment under 7.5 N load at a shear rate of 1 m/s; a) Uncoated 316 L b) nitrided 316 L, c) CrN/TiN coated 316 L ( — : Dry, — : Liquid).



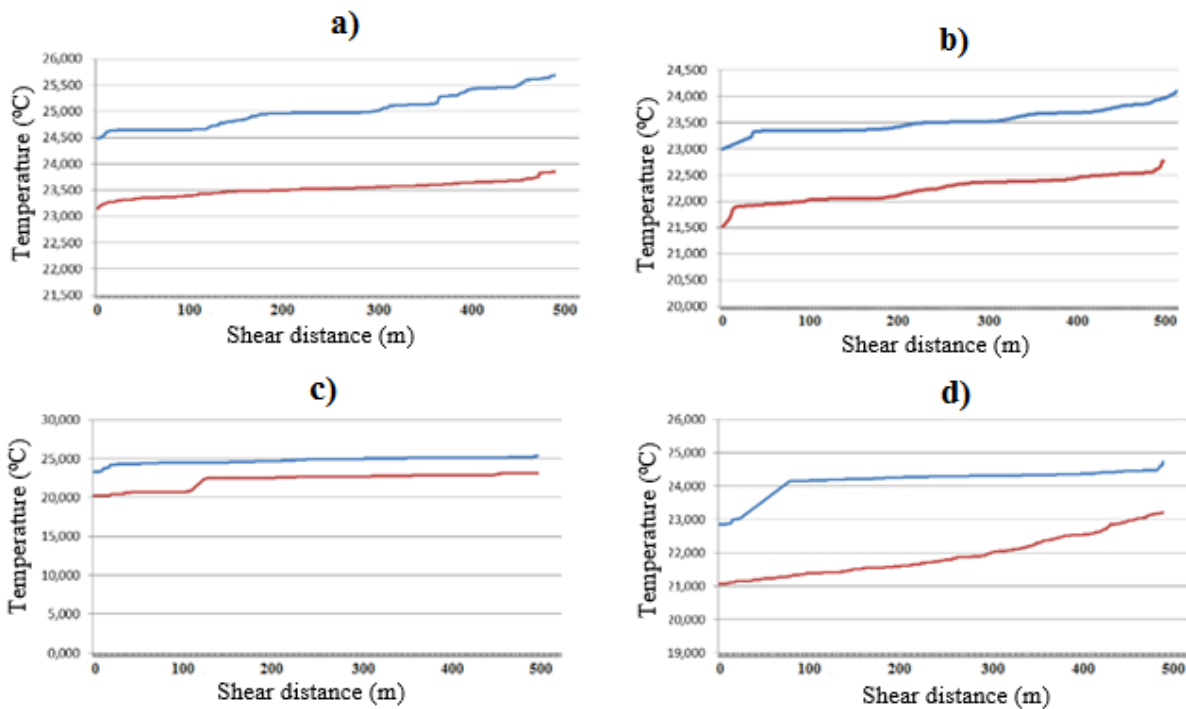
**Figure 9.** Effect of the sliding distance on the dry and liquid wear environment under 7.5 N load at a shear rate of 1.5 m/s; a) Uncoated 316 L b) nitrided 316 L, c) CrN/TiN coated 316 L ( — : Dry, — : Liquid).



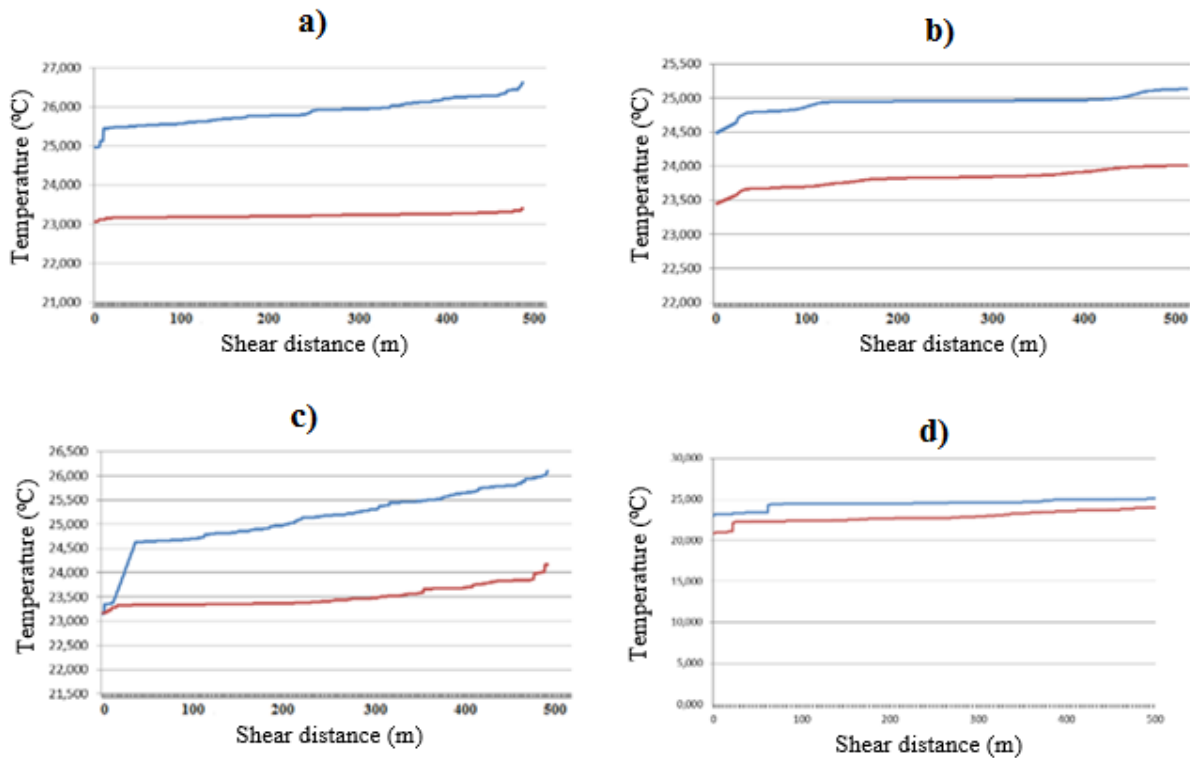
**Figure 10.** Effect of the sliding distance on the dry and liquid wear environment under 7.5 N load at a shear rate of 2 m/s; a) Uncoated 316 L b) nitrated 316 L, c) CrN/TiN coated 316 L ( — : Dry, — : Liquid).

Average temperature at a shear rate of 2 m/s; in uncoated 316 L sample, 26.8 °C in dry medium, 24.10 °C in liquid medium, nitrated 316 L sample, 26.2 °C in dry medium, 316 L sample in liquid medium 24.5 °C and CrN/TiN coated, in

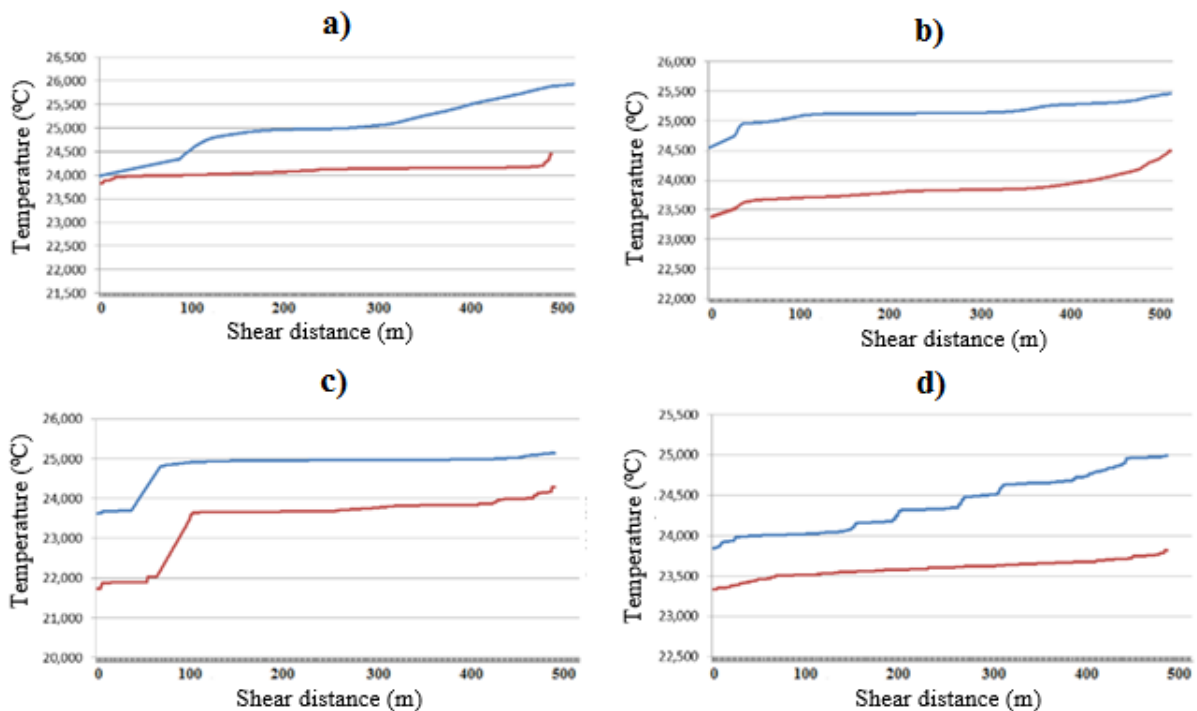
dry medium 26 oC and 21 °C in liquid medium. In the light of this information, it is seen that CrN/TiN coating reduces the temperature by 9% and the addition of sodium hyaluronate liquid by 15% - 20%.



**Figure 11.** Effect of the sliding distance on the dry and liquid wear environment under 10 N load at a shear rate of 1 m/s; a) Uncoated 316 L, b) Uncoated Ti-6Al-4V, c) Nitrided 316 L, d) CrN/TiN coated 316 L ( — : Dry, — : Liquid).



**Figure 12.** Effect of the sliding distance on the dry and liquid wear environment under 10 N load at a shear rate of 1,5 m/s; a) Uncoated 316 L, b) Uncoated Ti-6Al-4V, c) Nitrided 316 L, d) CrN/TiN coated 316 L ( — : Dry, — : Liquid).



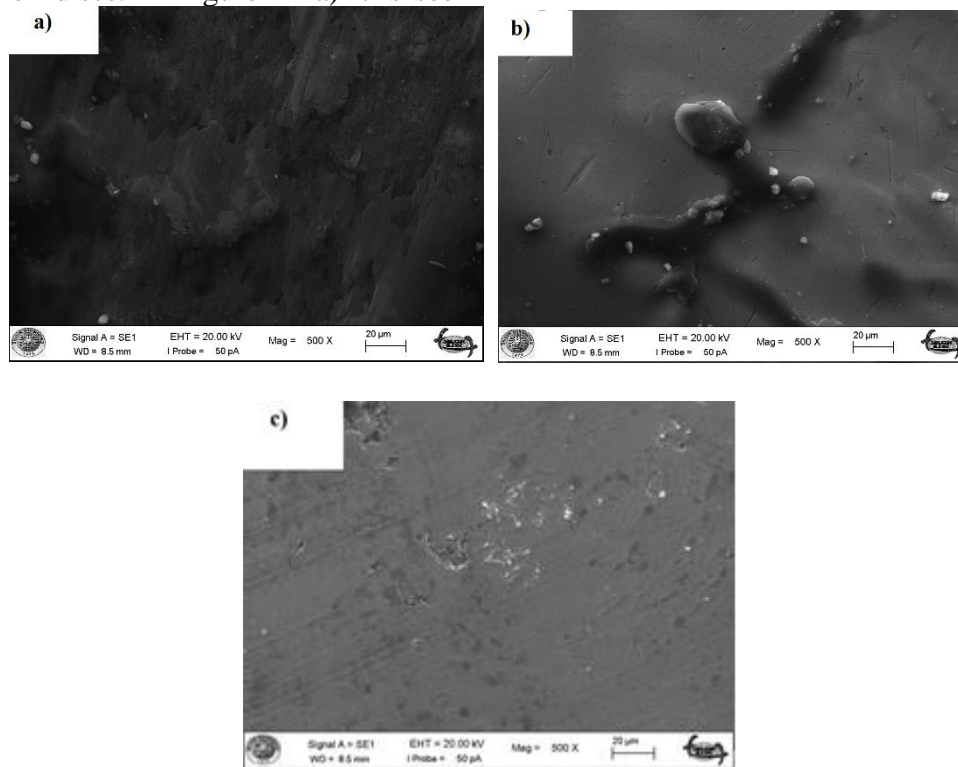
**Figure 13.** Effect of the sliding distance on the dry and liquid wear environment under 10 N load at a shear rate of 2 m/s; a) Uncoated 316 L, b) Uncoated Ti-6Al-4V, c) Nitrided 316 L, d) CrN/TiN coated 316 L ( — : Dry, — : Liquid).

When the figures were examined, it was seen that the coatings contributed to the reduction of the temperature at every load and shear rate and this contribution was between 9% and 15%. In addition, it was found that sodium hyaluronate fluid also contributed 20%-30% to lower the temperature.

#### SEM images reviews

Figure 14 and Figure 15 show SEM images of wear marks on discs. In Figure 14 a) it is seen

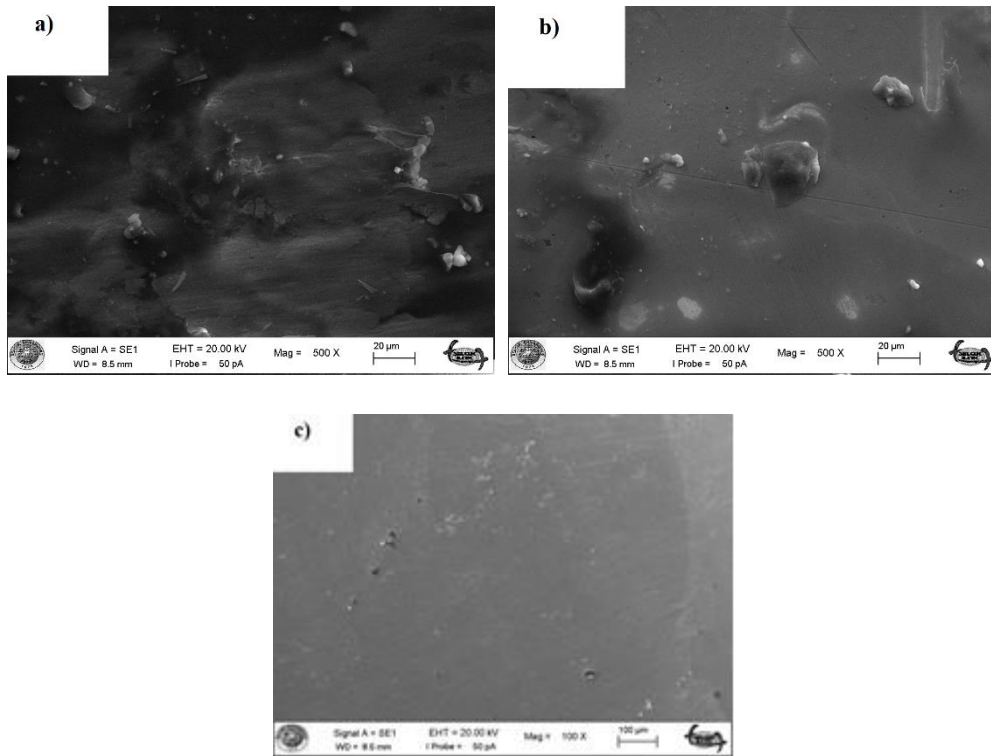
that very intense abrasive abrasions occur in the uncoated 316 L sample. It is seen that the ball has caused abrasive abrasion in the uncoated sample and formed wide wear channels. In Figure 14 b) it is seen that the abrasions of abrasive wear and wear channels in the nitrided 316 L sample decrease with increasing surface quality. As shown in Figure 14 c), abrasive wear was observed in CrN/TiN coated 316 L samples, however, the resulting damage occurred at much lower rates. As can be seen from the figures, the wear marks on the samples with decreasing surface hardness gradually decreased and the wear marks were reduced to almost none.



**Figure 14.** Wear marks on disc surfaces at 1.5 m/s shear rate and 7.5 N load; a) Uncoated 316 L, b) Nitrided 316 L, c) CrN/TiN coated 316L.

When Figure 15 is examined, As with Figure 14, the abrasion marks on the samples with increasing surface hardness decreased gradually and the wear marks on the CrN/TiN coated 316

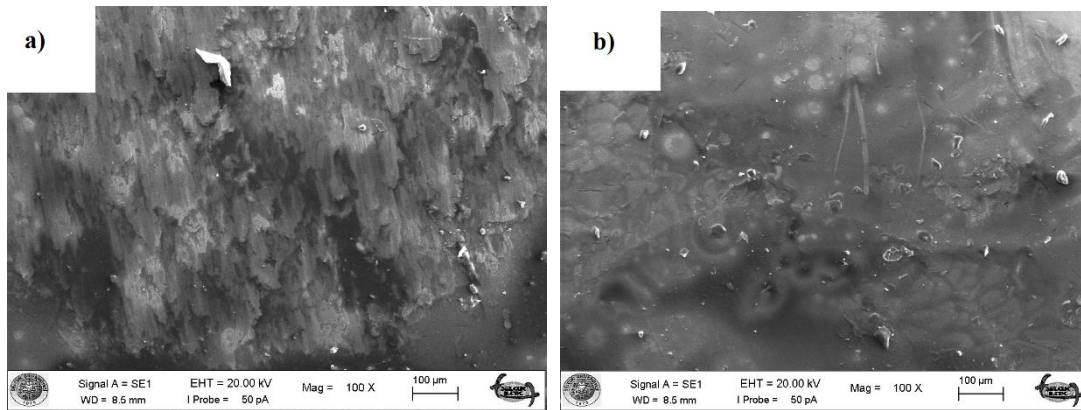
L samples, which were the most hard samples, were reduced to almost none.

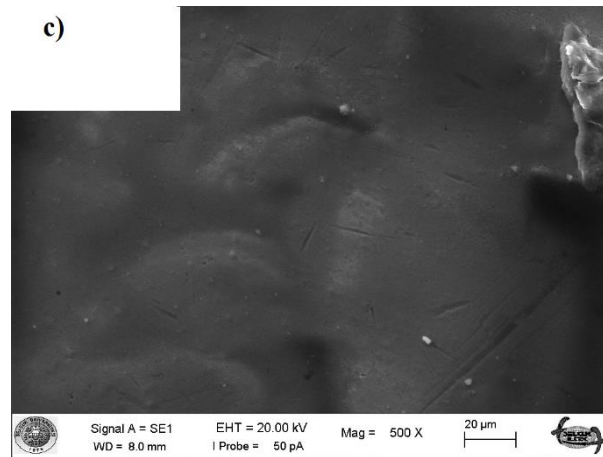


**Figure 15.** Wear marks on disc surfaces at 2 m/s shear rate and 7.5 N load;  
 a) Uncoated 316 L, b) Nitrided 316 L, c) CrN/TiN coated 316L.

materials with high chemical stability do not adhere to the surface of the abraded material and show their lubricity properties.

Figure 14 and figure 15 together with the increase in the slip rate of wear marks appear to tend to decrease. This is due to the fact that the





**Figure 16.** Wear marks on disc surfaces at 1.5 m/s shear rate and 10 N load; a) Uncoated 316 L, b) Nitrided 316 L, c) CrN/TiN coated 316L.

Figure 16 shows SEM images of abrasion traces on discs at a shear rate of 1.5 m/s and under 10 N load. As seen in the previous figures, there are also traces of deep abrasive wear in the uncoated 316 L sample. In the nitrided sample, although some abrasive abrasion is observed, it is seen that the sample is very low compared to the uncoated sample. In the CrN/TiN coated sample, it can be clearly seen that abrasive abrasions remain at the level of simple scratches. Nitrided and CrN/TiN coated samples showed that abrasive wear was reduced with increasing surface hardness.

## Conclusions

In this study; The abrasion performances of CrN / TiN coated, plasma nitrided and uncoated AISI 316 L stainless steel with PVD - Cathodic Arc method were investigated under liquid friction operating conditions using dry and sodium hyaluronate fluid in the Ball-Disc test apparatus.

Ti-6Al-4V material is generally used in biomaterials applications. However, this material is difficult to supply and is also an expensive material from an economic point of view. For all these reasons, 316 L materials which be economically more suitable for supply has been used as test material. The test specimens made from Ti-6Al-4V material were also tested under the same conditions and the wear performances were compared.

As a result, in the experiments performed working conditions in the Ball-Disc test apparatus;

1. If the 316 L samples are compared with those of other samples by wear of the PVD method, it is seen the decrease the amounts and ratios of abrasion and also It has been found that the abrasive wear marks on the surface of the samples decrease.
2. Sodium hyaluronate liquids have been found to reduce the amount and ratio of wear when compared to dry medium.
3. The 316 L samples coated with the PVD method showed better wear performance than the uncoated Ti-6Al-4V material.
4. Considering the density differences of Ti6Al4V and 316L materials, 316L can be used instead of Ti6Al4V material.
5. In the following studies, it is recommended to make a comparison between Ti6Al4V and 316 L under different conditions with the tests to be performed with artificial body fluid.

## References

1. Gümüşderelioğlu, M. Metallic biomaterials. Science and Technical Journal **2002**, July Issue, 4.
2. Kohn, D. H. Metals in medical applications. Current Opinion in Solid State and Materials Science **1998**, Vol. 3 (3), pp. 309-316.
3. Alsaran, A. Determination of structural, mechanical and tribological properties of AISI 5140 steel applied to duplex surface treatment. Ph.D. Thesis,

- Ataturk University, Institute of Science and Technology, Erzurum, **2001**.
4. Janoss, B. PVD/CVD tool coatings enhance stamping & forming of stainless steels. *Metal Forming (USA)* **1999**, Vol. 33 (3), pp. 110-112.
  5. Tokaji, K.; Ogawa, T.; Shibata, H. The effect of gas nitriding on fatigue behaviour in pure titanium. *International journal of fatigue* **1994**, Vol. 16 (5), pp. 331-336.
  6. Zhao, Q.; Zhai, G.J.; Ng, D.; Zhang, X.Z.; Chen, Z.Q. Surface modification of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bioceramic by NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ion implantation. *Biomaterials* **1999**, Vol. 20 (6), pp. 595-599.
  7. Zhecheva, A.; Sha, W.; Malinov, S.; Long, A. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. *Surface and Coatings Technology* **2005**, Vol. 200 (7), pp. 2192-2207.
  8. Burg, T.; Standard, O. *Materials for Biomedical Engineering*. School of Materials Sciences and Engineering University of New South Wales **2001**.
  9. Çelik, İ.; Eroğlu, H. Selection application of material to be used in hip prosthesis production with analytic hierarchy process. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* **2017**, Vol. 48(11), pp. 1125-1132.
  10. Tas, A.C. Synthesis of biomimetic Ca-hydroxyapatite powders at 37 C in synthetic body fluids. *Biomaterials* **2000**, Vol. 21 (14), pp. 1429-1438.
  11. Fouquet, V.; Pichon, L.; Drouet, M.; Straboni, A. Plasma assisted nitridation of Ti-6Al-4V. *Applied Surface Science* **2004**, Vol. 221 (1), pp. 248-258.
  12. Lautenschlager, E.P.; Monaghan, P. Titanium and titanium alloys as dental materials. *International dental journal* **1993**, Vol. 43 (3), pp. 245-253.
  13. Massiani, Y., Gravier, P., Crousier, J., Fedrizzi, L., Dapor, M.; Micheli, V.; Roux, L. Effects of ion beam implantation on the corrosion behaviour of TiN-coated Ti-6Al-4V alloy. *Surface and Coatings Technology* **1992**, Vol. 52 (2), pp. 159-167.
  14. Berríos, J.; Teer, D.; Puchi-Cabrera, E. Fatigue properties of a 316L stainless steel coated with different TiN<sub>x</sub> deposits. *Surface and Coatings Technology* **2001**, Vol. 148 (2), pp. 179-190.
  15. Borgioli, F.; Fossati, A.; Galvanetto, E.; Bacci, T. Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment temperature. *Surface and Coatings Technology* **2005**, Vol. 200 (7), pp. 2474-2480.
  16. Dogan, H.; Findik, F.; Morgul, O. Friction and wear behaviour of implanted AISI 316L SS and comparison with a substrate. *Materials & design* **2002**, Vol. 23 (7), pp. 605-610.
  17. Fossati, A.; Borgioli, F.; Galvanetto, E.; Bacci, T. Corrosion resistance properties of glow-discharge nitrided AISI 316L austenitic stainless steel in NaCl solutions. *Corrosion Science* **2006**, Vol. 48 (6), pp. 1513-1527.
  18. Sun, Y.; Bell, T. Sliding wear characteristics of low temperature plasma nitrided 316 austenitic stainless steel. *Wear* **1998**, Vol. 218 (1), pp. 34-42.
  19. Feng, H.; Lee, S.; Hsu, C.; Ho, J. Study of high cycle fatigue of PVD surface-modified austempered ductile iron. *Materials chemistry and physics* **1999**, Vol. 59 (2), pp. 154-161.
  20. Ranea, C. Wear resistance of thin coatings based on titanium. *International Conference on Tribology* **2002**, Kayseri, pp. 15-18.
  21. Yi, Z.; Xiao, Z.; Ma, F.; Zhang, T.; Li, Y. Wear resistance properties of stainless steel modified with co-implantation of V<sup>+</sup> C. *Surface and Coatings Technology* **2000**, Vol. 128, pp. 186-191.

## Toz Üretim Süreçlerinin Yağlamalı Yataklar Üzerine Etkisi

### *Effect of Powder Production Processes on Lubricated Bearings*

Levent Urtekin<sup>1\*</sup>, Rahmi Ünal<sup>2</sup>, Özer Aydın<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, levent.urtekin@ahievran.edu.tr

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, runal@gazi.edu.tr

<sup>3</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Kütahya, ozeraydin@du.edu.tr

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*

Geliş: 12 Aralık 2019  
Düzeltilme: 9 Mart 2020  
Kabul: 10 Mart 2020

*Anahtar kelimeler:*

Su/gaz atomizasyon, sinterleme,  
yağlamalı yataklar

#### ÖZET

Bu çalışmada; iki farklı atomizasyon yöntemi (su ve gaz) ile kendinden yağlamalı yatak presleme amaçlı CuSn10 (bronz) ve Cu (bakır) tozu üretilmiştir. Su atomizasyonu ile CuSn10 ve gaz atomizasyonu ile Cu tozu üretilmiştir. Su atomizasyonu ve gaz atomizasyonu ile üretilen CuSn10 ve Cu tozlarının ortalama toz boyutu sırasıyla 41.5 µm ve 41.9 µm'dir. Çalışmada üretilen tozlar ve mevcut uygulamada kullanılan tozlar ile normal presleme (tek eksenli) yöntemiyle kendinden yağlamalı yatak üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra hidrojen ve azot gazı karışımından oluşan koruyucu atmosfer altında 780 0C sıcaklıkta farklı bekleme süreleri için sinterleme işlemi uygulanmıştır. Sinterlenen yatakların yağ alma, hacimsel gözenek oranları ve kırılma dirençleri deneysel olarak belirlenmiştir. Çalışmada 6,4 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk, %28 gözenek, 45 ksi radyal mukavemet ve % 96 yağ alma verimi hedeflenmiştir. Bu hedeflerden yoğunluk ve gözenek miktarı elde edilmesine karşın mukavemet ve yağ alma verimi hedeflenen değerlere göre düşük kalmıştır.

Doi: 10.24012/dumf.645887

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 12 December 2019  
Revised: 9 March 2020  
Accepted: 10 March 2020

*Keywords:*

Water/gas atomization, sintering,  
lubricated bearings

#### ABSTRACT

In this study; CuSn10 (bronze) and Cu (copper) powder were produced for self-lubricating bed pressing with two different atomization methods (water and gas). CuSn10 was produced by water atomization and Cu powder was produced by gas atomization. The average powder size of CuSn10 and Cu powders produced by water atomization and gas atomization are 41.5 µm and 41.9 µm, respectively. In this study, self-lubricated bearings were produced by using normal pressing (uniaxial) method with the powders produced and the powders used in the present application. Subsequently, sintering process was carried out for different residence times at 780 0C under protective atmosphere consisting of hydrogen and nitrogen gas mixture. Degreasing, volumetric pore ratios and fracture resistance of sintered beds were determined experimentally. In this study, 6.4 g / cm<sup>3</sup> density, 28% pore, 45 ksi radial strength and 96% degreasing efficiency were targeted. Although density and pore amount were obtained from these targets, strength and degreasing efficiency were lower than the target values.

\* Sorumlu yazar / Correspondence  
Levent URTEKİN  
✉ levent.urtekin@ahievran.edu.tr



## Giriş

Gaz atomizasyon yöntemi metal tozu üretim yöntemleri arasında ince ve küresel toz üretmede en yaygın kullanılan tekniktir [Gu ve Zeoli, 2006]. Tozun şekli, belirli atomizasyon parametreleri için toz büyüklüğü ile ilgilidir. Toz şekli üzerinde en önemli etkiye sahip olan parametre; sıvı damlacıkların soğuma oranıdır. İri tozlar parçalanması tam olarak gerçekleşmemiş tozlardır. Bu tozlar atomizasyondan sonra her bir damlacığın çarpışmasıyla üretilirler [Uslan, Saritas ve Davies, 1999]. Deneysel çalışmada gaz atomizasyonu için mannesmann tipi daralan nozul kullanılarak kalay tozu üretim parametreleri araştırılmıştır [Uslan ve Küçükarslan, 2010]. Literatürde anlaşılacağı üzere küresel toz üretimi daha çok gaz atomizasyonu ile üretilmekle birlikte çalışmada su atomizasyonu yöntemi ile de toz üretilerek kendinden yağlamalı yataklar için çeşitli testlerden geçirilmiştir.

Kendinden yağlamalı gözenekli yatak, toz metalürji endüstrisi tarafından üretilen en yaygın ürünlerdir. Başlıca avantajı, gözeneklerinin yağlayıcı ile doldurulmuş olması, kendi kendine yağlama etkisi sağlayan bir yağ haznesi rolü oynamasıdır [Fedorchenko ve Pugina, 1980; Moshkov, 1968]. Kendiliğinden yağlamalı yataklarda ısınmanın önlenmesi gözeneklerde bulunan yağlama ile sağlanır ve buda sınır tabakasının hızlı bir şekilde toparlanmasına yol açar. Malzemenin düşük gözenekli olması durumunda yatağın çalışma yüzeyinde daha yüksek sıcaklık artışına neden olur. Yatağın gözenekliliğinin artmasıyla birlikte, yağ rezervi gözeneklerine yerleştirildiği için artar ve sonuç olarak yağ, çalışma yüzeyinde sıcaklık daha küçük bir artış meydana getirir [Fedorchenko ve Pugina, 1980; Moshkov, 1968]. Bu nedenle, yağ emdirme kalitesi, gözenekli kendinden yağlamalı yataklar için güvenli ve sürekli çalışmanın ana faktörlerinden biridir. Çoğu zaman, kendinden yağlamalı yatakların gözenekliliği % 20-30 arasındadır [Fedorchenko ve Pugina, 1980; Libenson, 1982]. Bununla birlikte, gözenekliliğin büyümesi bu malzemelerin mukavemet özelliklerinde (darbe mukavemetinde) önemli bir azalma ve ayrıca bunların ısı iletkenliklerinde bozulma meydana gelir [Fedorchenko ve Pugina, 1980]. İlave olarak artan porozite aşınmayı kötüleştirir, sürtünme katsayısını

arttırır ve bu nedenle aşınmayı arttırır [Fedorchenko ve Pugina, 1980; Kiparisov ve Libenson, 1971]. Bu nedenle, kendiliğinden yağlama sisteminde sinterlenmiş yatakların güvenli ve sürekli çalışmasında ana faktör olan yatakların somut çalışma koşullarını, istenen yağ emdirme kalitesini sağlayan optimum gözeneklilik seviyesinin seçilmesi gerekir. Gözeneklerin büyüklüğünü kontrol etmek için literatürde [Kiparisov ve Libenson, 1971; Belov, 1982] tarif edildiği gibi bir takım teknikler geliştirilmiştir: başlangıçtaki tozların tane büyüklüğünün seçimi (başlangıç tozlarının parçacık büyüklüğünün kalınlaştırılması, gözenek büyüklüğünü arttırır), sıkıştırma basınçlarında değişiklikler, toz karışımları ve uygun sinterleme süreleri seçimidir.

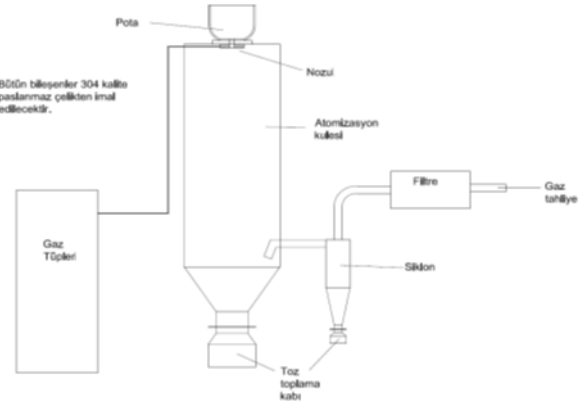
Kendiliğinden yağlanan rulmanlar, PM tekniği ile elde edilen gözenekli malzemelerin en eski endüstriyel uygulamasını temsil eder, çünkü metalik filtreler ve bujiler başka teknoloji tarafından üretilemez. Son yıllarda, demir bazlı sinter yatakların üretimi, demir tozlarının düşük maliyet ve kullanılabilirliği ve ayrıca yüksek mukavemeti nedeniyle bakır bazlı olanlar pahasına önemli ölçüde artmıştır. Parçaların mekanik özellikleri, malzemenin bileşimi ile güçlü bir şekilde ilişkilidir. Tribolojik uygulamalar için, yüzeyin özellikleri malzemede oluşturulan farklı metalik ve metaller arası fazlara bağlanır. Toz metalürjisi işlemleriyle yapının kontrollü homojenliği, geleneksel teknolojiler tarafından üretilmeyen özel özelliklere sahip malzemelerin elde edilmesini mümkün kılar. Birçok sinter parça, hali hazırda % 20 ila % 15 gözeneklilikte, örneğin dökme demire benzer, yeterince yüksek mukavemetli özelliklere ulaşır. Gözenekli malzemelerin, geleneksel teknolojilerle elde edilen sıkıştırılmış malzemelere göre en büyük avantajı, kendi petrol rezervuarı gibi davranan gözenekleridir. Kendiliğinden yağlanan rulmanlar, gözeneklilik seviyesi yüksek olduğunda üstün performans sağlar, bu nedenle hareketsizlik sürelerinde gözeneklerde yeterli yağ birikir ve shaft içinde dönmeye başladığında sızıntı yapar. Aynı zamanda, malzeme yoğunluğu iyi yük taşıma kapasitesi sergilemek için kendinden yağlamalı yataklar için önemli bir rol oynar. Bu nedenle, parçanın gerçek yükleme koşullarını bilmek ve malzemenin alarım ve işleme koşullarını bu şartlar temelinde değiştirmek esastır.

Sinterlenmiş demir bazlı sürtünme önleyici malzemeler, zayıf korozyon direnci ve sürtünme özellikleri nedeniyle son on yıla kadar gelişmemiştir. Düşük maliyet ve demir kullanılabilirliği göz önüne alındığında, bakır, grafit, manganez, kurşun, fosfor, bor ve teneke demir gibi ilaveler denenmiştir. Ancak bir özellikte iyileştirme sağlanırken diğer özelliklerde bir düşüşle dengelenmiştir [Kostornovand ve Fushchich,2007 - Vasil'ev ve Shvetsova ve Berent ve Bushe,1982]. Sürtünme önleyici ve mekanik özellikleri arttırmak için, bu çalışma Fe-Cu-Sn-Pb-MoS<sub>2</sub> sürtünme önleyici alaşımların geliştirilmesine odaklanmaktadır. Malzeme tozlarının kalitesi ve üretim süreçleri iyileştirildiği için çoğu zaman toz metalürji parçaları döküm ve dövme ürünlerin yerini almıştır. Boyutlandırma ve işleme gibi müteakip işlemlerden kaçınmak için, sinterleme işleminden sonra elde edilen nihai boyut toleranslarını geliştirmek çok önemlidir. Boyutsal değişikliklere neden olan birçok faktör vardır ve bunların birleşik etkisi bu değişiklikleri tahmin etmeyi ve kontrol etmeyi zorlaştırır. Bu çalışmada, farklı parametrelerin sinterlenmiş demir bazlı alaşımların boyutsal değişiklikler üzerindeki etkisinin deneysel sonuçları bildirilmiştir. Ayrıca sinterlenmiş parçaların yoğunluğu araştırılmış ve böylece sinterleme sıcaklığının ve zamanın kendinden yağlamalı yataklar için demir bazlı malzemelerin yoğunluğu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sinterleme parametrelerinin yoğunluk ve boyut değişiklikleri üzerindeki etkileri, Statistica yazılımı kullanılarak 3B yüzey çizimleri olarak sunulmaktadır [Teisanu ve Gheorghe,2011].

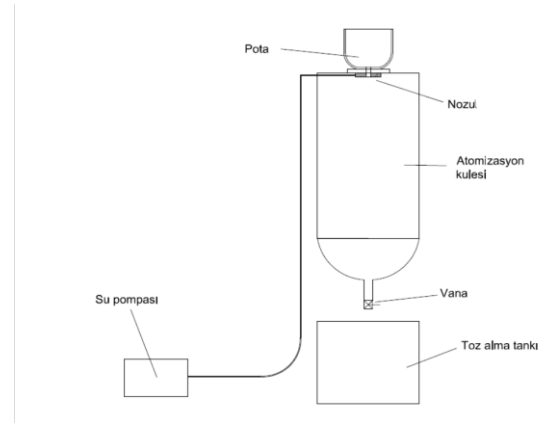
### Materyal ve Yöntem

Çalışmada, iki farklı gaz ve su atomizasyonu toz üretimi yapılmıştır. Bu çalışmada hem su atomizasyonu hemde gaz atomizasyonu için aynı indüksiyon ocağı ile 30 kg bakır ve bronz ergitmek mümkün olmuştur. Atomizasyon süresi yaklaşık olarak 4-6 dakika arasında gerçekleştirilmiştir. Şekil 1 ve 2'de atomizasyonların şematik resmi verilmiştir. Üretilen ve karakterize edilen tozlar ile yatak üretim denemeleri yapılmıştır. İmalat deneme çalışmalarında 25,4mm dış çap, 19mm iç çap ve 19mm yükseklikte yatakların imalatı yapılmıştır. Bu denemeler sırasında sıkıştırma basıncı ve yağlayıcı karışım oranlarının parça özelliklerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar

sonucunda en uygun parça üretim şartları belirlenmiştir.



Şekil 1. Gaz atomizasyon ünitesi şematik resmi



Şekil 2. Su atomizasyon ünitesi şematik resmi

Bu amaçla yatakların radyal kırılma mukavemeti, gözenek miktarı test ve yağ depolama kapasiteleri tespit edilmiştir. Bu testler sonucunda yatakların "MPIF Standard: CT-1000-K19 ASTM: B 438-83a Class A, Type 1" standartlarına uygunluğu değerlendirilmiştir.. Kendinden yağlamalı yataklar kalıplarda 6,4 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk elde edilecek şekilde sıkıştırıldıktan sonra 780 0C, 20-30-45 dk. bekleme sürelerinde, hidrojen ve azot gazı karışımından oluşan koruyucu atmosfer altında sinterlenmiştir. Bu şekilde farklı sıcaklıklarda yatak üretim deneylerinin amacı sıcaklığın sinterleme sonrası ölçülecek olan boyut değişimine, radyal kırılma dayanımına, gözenek büyüklüğüne ve oranına etkisini belirlemektir. Radyal kırılma dayanımı ( ISO 2739 ) için hedeflenen değer min. 45 ksi'dir. Sıkıştırma basıncı 138 – 345 MPa olacaktır.

T/M ile üretilen kendinden yağlamalı yataklar gözenekli yapıya sahip olduğu için Arşimet prensibine göre hacim hesaplanırken numuneler

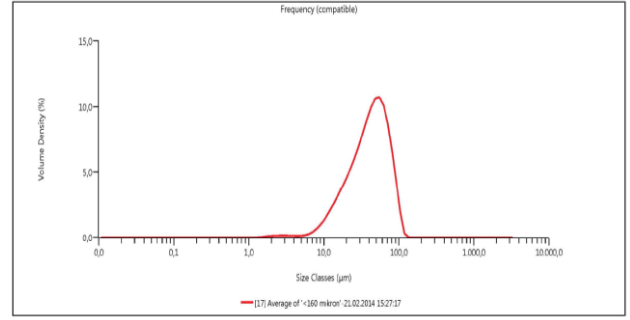
suya daldırıldığında gözeneklerin suyla dolması kaçınılmazdır. Bu hem hacim ölçümünün hatalı olmasına neden olur, hem de gözeneklere dolan suyun daha sonra uzaklaştırılmasında problemler meydana getirir. Bunu önlemek için, üretilen yatakların yüzeylerinin su geçirgenliği olmayan bir malzeme ile film tabakası şeklinde kaplanması gerekmektedir. Bunun için TS 2305 EN ISO 2738’de belirtildiği şekliyle parafin (%5) kloroform (%95) çözeltisi hazırlanarak sinterlenmiş deney numuneleri bu çözelti içine daldırılarak yüzeylerinin kaplanması sağlanmıştır. Sonrasında ise numuneler, kloroformun uçması için desikatörde 1 saat kurumaya bırakılmışlardır. Kurutulmuş numuneler 0,0001 g hassasiyetle tartılmıştır. Standarda uygun biçimde Arşimet prensibi uygulanmış ve numunelerin saf sudaki ağırlıkları ölçülmüştür. Hacim hesabı bittikten sonra numunelerin yüzeylerini kaplayan parafinin uzaklaştırılması için numuneler 65°C’deki etüv fırında 1 saat bekletilmiştir.

**Tablo 1.** Üretilen yatak ve özellikleri

No	Sinterleme Sıcaklığı ve Süresi	Özellik
SL1	780 °C-20 dk.	Ticari
SL2	780 °C-20 dk.	Ticari
SL3	780 °C- 30 dk.	Karışım
SL4	780 °C- 45 dk.	Karışım
SL5	780 °C- 20 dk.	Karışım
SL6	780 °C- 20 dk.	Karışım+%1 ilave
SL7	780 °C- 20 dk.	Difüzyon alaşımı+%1 gaz atomizasyon

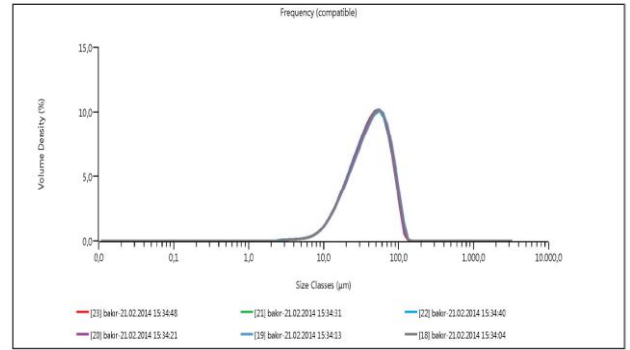
## Deneysel Sonuçlar

Su atomizasyonu yönteminde su/metal debisi önemli bir etken olup 17 bar basınçta ortalama 41,9 mikron ortalama toz boyutunda bronz tozu üretilmiştir (Şekil 3). Bronz toz boyut dağılımı ise d(10,0) : 15,8 mikron ve d(90,0): 77,5 mikron olarak elde edilmiştir.



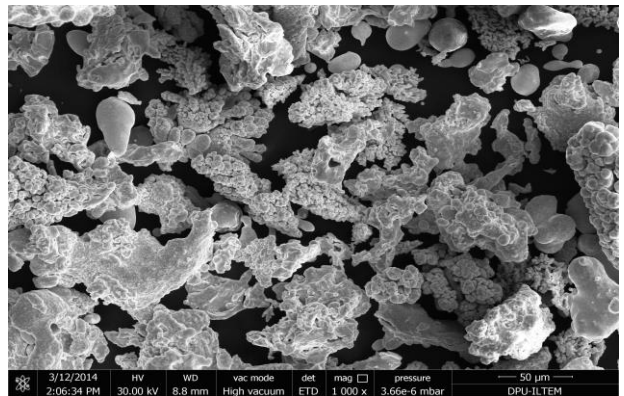
**Şekil 3.** Su atomize bronz toz boyut dağılımı

Gaz atomizasyonunda gaz/metal kütleli debi oranı arttıkça bakır toz boyutunun azaldığı belirlenmiştir. 18 bar basınç uygulamasında ortalama toz boyutu 41,5 mikron bakır tozu üretilmiştir (Şekil 4). Bakır toz boyut dağılımı ise d(10,0) : 16,5 mikron ve d(90,0): 76,4 mikron olarak elde edilmiştir.

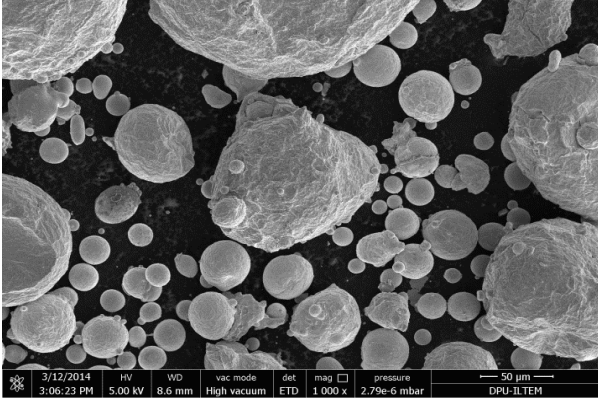


**Şekil 4.** Gaz atomize bakır toz boyut dağılımı

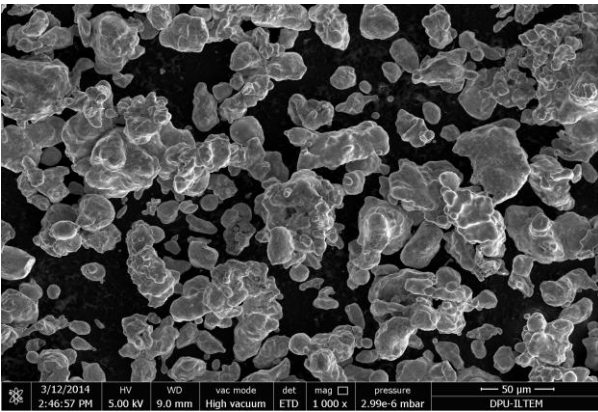
DPUİLTEM’de çalışma kapsamında üretilen tozların ve ticari olarak kullanılan tozların SEM görüntüleri Şekil 5-7’de verilmiştir. Su atomize tozlarının toz şekli açısından ticari tozlara benzediği görülmüştür.



**Şekil 5.** Ticari kendinden yağlamalı yatak toz görüntüsü

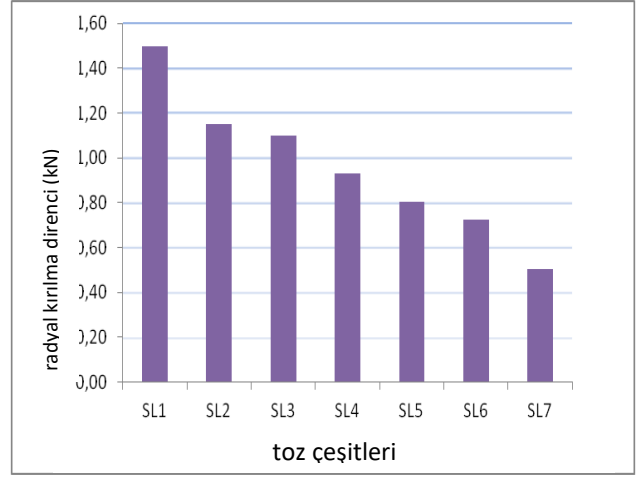


Şekil 6. Gaz atomizasyon bakır toz görüntüsü

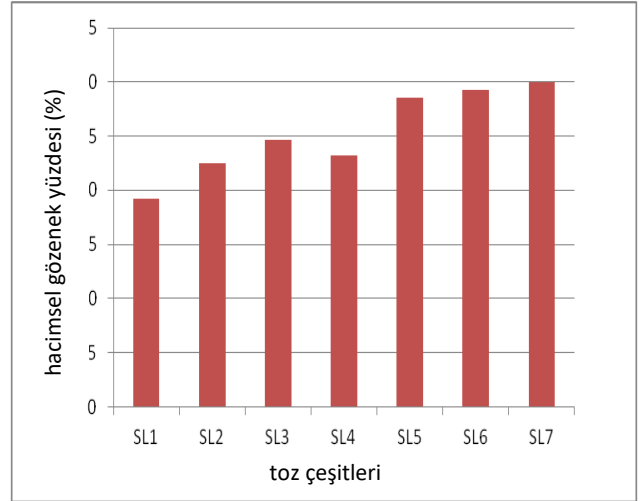


Şekil 7. Su atomizasyon bronz toz görüntüsü

Üretilen tozlardan imal edilmiş yatakların gözenek miktarının sinterleme şartlarına göre değiştiği (%28,5, %24,7, %23,2), ticari olarak alınan tozlara göre (SL1: %19,2, SL2:%22,5) daha fazla miktarda gözenek hacmine sahip olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak mukavemet ve yağ alma verimleri göreceli olarak düşük kalmıştır. Ancak SL2 nolu ticari toz değerlerine yakın mukavemet ve yağ alma verimi elde edilmiştir.

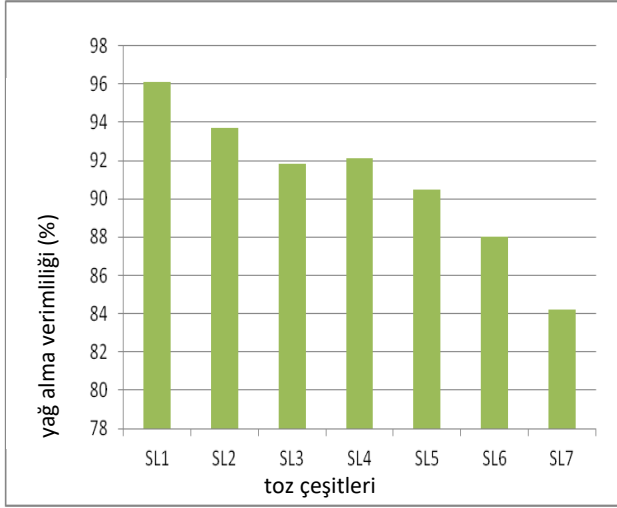


Şekil 8. Radyal kırılma direnci değişimi



Şekil 9. Hacimsel gözenek miktarı değişimi

Çalışmada 6,4 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk, %28 gözenek, 45 ksi radyal mukavemet ve % 96 yağ alma verimi hedeflenmiştir. Bu hedeflerden yoğunluk ve gözenek miktarı elde edilmesine karşın mukavemet ve yağ alma verimi hedeflenen değerlere göre düşük kalmıştır. Değişik parametreler ile araştırmaların yapılması gerektiği tespit edilmiştir.



Şekil 10. % Yağ alma verimlilik değişimi

## Sonuçlar ve Tartışma

Kendinde yağlamalı yatak üretimi için ticari tozlara alternatif toz üretim amaçlı yapılan çalışmada 780 °C sıcaklık ve 30 dk. süre ile sinterlenen yatakların ticari tozlara yakın özellikler sergilediği söylenebilir. Bu özellikler sırasıyla radyal kırılma direnci, hacimsel gözenek yüzdesi ve yüzde yağ alma verimliliği olarak belirlenmiştir.

Uslan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada bronz yataklar için 0.02 MPa basınç ve 80 ° C sıcaklık ve 10 dakikalık vakum süresi için maksimum yağ emdirme kapasitesi % 95.05 olarak elde edilmiştir. [Uslan, Atak, Urtekin ve Sarıtaş, 2008]. Mevcut çalışmada ise vakum işlemi yapılmadan yağ alma verimlilikleri maksimum %92'ler seviyesindedir. Vakum yardımı ile yağ alma verimliliğini araştırılması üretilen tozların özelliklerini belirleme açısından faydalı olacaktır.

## Teşekkür

Çalışma TÜBİTAK 5120001 No'lu proje kapsamının da desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- Gu, S., Zeoli, N., 2006, *Numerical Modelling of Droplet Break-Up for Gas Atomisation*, Computational Materials Science, vol. 38, no:2 pp. 282.
- Uslan İ, Küçükarslan S., 2010, *Kalay tozu üretimine gaz tomizasyonu parametrelerinin etkisinin incelenmesi*, Gazi

Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, cilt 25, no:1, pp.1.

Uslan I, Saritas S, Davies TJ., 1999, *Effects of variables on size and characteristics of gas atomised aluminium powders*, Powder Metallurgy, vol. 42, no:2, pp. 157.

Fedorchenko I. M., Pugina L. I., 1980, *Composite sintered antifriction materials* (in Russian), Kiev, Naukovadumka, pp. 404.

Moshkov A. D., 1968, *Porosanti friction materials* (in Russian), Moskow, Mashinostroenie, pp. 208.

Eisenkolb F., 1969, *Successes of powder metallurgy* (translated from German language by A. K. Natanson), Moskow, Metallurgia, pp. 540.

Arnold N. A., Carbon K. C., Straub V. C., 2008, *Powder metallurgy bearings*, Powder Metal Technologies and Applications, vol. 7, pp. 1051-1057.

Libenson G.A., 1982, *Manufacturing of sintered parts. Text book for technical school* (in Russian), Moskow, Metallurgia, pp. 256.

Kiparisov S.S., Libenson G. A., 1971, *Powder metallurgy* (in Russian), Moskow, Metallurgia, pp. 528.

Belov S.V., 1987, *Porospenetrable materials. Reference media.* (in Russian), Moskow, Metallurgia, pp. 335.

Kostornovand A.G., and Fushchich O.I., 2007, *Sintered antifriction materials*, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, vol. 46, no. 9-10, pp. 503-512,

Kostornov A.G., Fushchich O. I., and Chevichelova T. M., 2007, *Structurization in sintering of antifriction powder materials based on iron-copperalloys*, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, vol. 46, no. 11-12, pp. 589-594,

Vergheesand R. and Gopinath K., 1989, *Influence of antimony additions on sintered iron-copper bearing materials*, Key Engineering Materials, vol. 29-31, pp. 457-464.

Vasil'ev Y. M., Shvetsova G. A., Berent V. Y., and Bushe N. A., 1982, *Antifriction properties of an ironbase material containing amanganeseult raphosphate*, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, vol. 21, no. 7, pp. 592-594.

Teisanu C. and Gheorghe S., 2011, *Development of New PM Iron-Based Materials for Self-Lubricating Bearings*, Advances in Tribology, pp: 1-11.

Uslan İ, Atak Y., Urtekin L., Sarıtaş Ş., 2008, *Investigation of The Effects of Parameters to Oil Impregnation Capacity*, 5. International Powder Metallurgy Conferences, pp. 829.

# Sol-Jel Yöntemiyle TiO<sub>2</sub> ve HAP Kaplanan Ti6Al7Nb Alaşımının Mikroyapı ve Aşınma Davranışı

## Nihat Tosun

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[ntosun@firat.edu.tr](mailto:ntosun@firat.edu.tr), ORCID: 0000-0002-6211-5044

## Saleh Zakar Kurmi

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[salehzakar@gmail.com](mailto:salehzakar@gmail.com), ORCID: 0000-0001-5205-4738

## Gül Tosun

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[gultosun@firat.edu.tr](mailto:gultosun@firat.edu.tr), ORCID: 0000-0001-8828-827X

Geliş: 27.12.2019, Revizyon: 25.02. 2020, Kabul: 10.03.2020

## Öz

*Bu çalışmada, implant olarak kullanılacak Ti6Al7Nb titanyum alaşımı üzerine sol-jel daldırma yöntemiyle farklı çözeltide bekletme sürelerinde (30, 60 ve 120 dak) yapılan kaplamaların mikroyapıları ve aşınma davranışları incelendi. Çalışmada, altlık malzemesi olarak Ti6Al7Nb alaşımı, kaplama malzemeleri olarak ise titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ve hidroksiapatit (HAP) kullanıldı. İki farklı kaplama yapılmış olup, birinci grup numuneler sadece TiO<sub>2</sub> ile kaplanırken, ikinci bir grup numuneler ise ilk önce TiO<sub>2</sub> ile daha sonra HAP ile kaplandı. Kaplanan numunelerin mekanik özelliğinin tespit edilmesi amacıyla, çizilme testleri yapılarak aşınma davranışları incelendi. Yapılan kaplamaların mikroyapı incelemeleri optik mikroskop ve SEM altında incelendi, katı hal elementel fraksiyonları EDX analizi ile belirlendi.*

**Anahtar kelimeler:** Sol-Jel, TiO<sub>2</sub>, HAP, Mikroyapı, Aşınma

## Giriş

Yüzey kaplama, yeni bir yüzey tabakası elde etmek amacıyla, ana malzemedan farklı özellikte olan ve kimyasal bileşimi bilinen bir malzemenin ana malzeme yüzeyine kaplanması işlemidir. Yüzeyinin yapışkanlığı, ıslanabilirliği, optik özellikleri, korozyon direnci, darbe direnci, aşınma direnci, çizilmeye karşı direnci vs. gibi fiziksel, kimyasal veya mekanik özelliklerini geliştirmek ve orijinal veya bozulan parçaların tamir etmek amacıyla yüzey kaplama uygulanmaktadır. Kaplamada, bir altlık malzeme yüzeyine ince ve koruyucu değeri yüksek bir tabakanın oluşturulmasıyla malzeme özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır [1]. Kaplama işlemleri sıvı, gaz veya katı madde olarak uygulanabilir. Yüzey kaplama sıcak daldırma, ısı püskürtme, lazer, kaynak yöntemi vs. kullanılarak fiziksel, mekanik ve kimyasal yöntemler ile gerçekleştirilmektedir. Uygulamalarda kullanılan kaplama yöntemleri, sert yüzey kaplama, takviye kaplama (dolgu kaplama) ve giydirmeye kaplama (koruyucu kaplama) olarak sıralayabiliriz. Farklı malzemeler ve alaşımları üzerine yapılan kaplamalarda; kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD), termokimyasal kaplama, termal sprey ile kaplama, sol-jel yöntemi gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Kaplama yöntemlerinden biri olan sol-jel yöntemi, uygulamada oldukça önemli bir yere sahiptir. Sol-jel yöntemi, diğer kaplama yöntemlerine göre birtakım avantajlara sahip olması nedeniyle tercih edilmektedir. Homojen ve saf filmlerin düşük ısılarla hazırlanabilmesi ve enerji tasarrufu sağlanabilmesi, değişik geometrilere sahip parçaların bu metod kullanılarak homojen bir şekilde kaplanabilmesi, kirliliğe sebep olmaması bu yöntemin avantajları arasındadır. Kimyasallarla ilgili bir sorun olmadığı sürece sol-jel yöntemi tehlikesizdir. Kaplanan filmin mikro yapısı kolay bir biçimde kontrol edilebilmektedir. Bu yöntem ile gözenekli yapı elde edilebildiği için düşük kırılma indisli filmler elde etmek mümkündür. Ayrıca, çok katlı kaplama yapılabilen ve yöntem, cismin geometrisi ile sınırlı olmamaktadır. Sol-jel yönteminin avantajlarının yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Bu

dezavantajların başında, sol-jel yöntemi ile yapılan kaplama işlemi esnasında çok fazla malzeme kaybı olmasıdır. Zor bulunan bir kimyasal malzeme kullanılıyor ise maliyet yükselir, filmlerde karbon çözültüsü kalır, kullanılan kimyasal sağlığa zararlı olabilir. Bunun dışında, küçük gözeneklerin kalması, kaplama işleminin uzun sürmesi diğer dezavantajlar arasındadır [2].

Sol jelden türetilen ürünlerin uygulama alanları çok geniştir. Sol-jel yöntemi kullanılarak dünyanın en hafif malzemeleri ve üretilmesi en zor olan seramikleri üretilmiştir. Bu yöntemin en fazla kullanıldığı yerler, bir altlık parçasının üzerine spin kaplama veya daldırma kaplama ile üretilen ince filmlerin üretildiği imalatlardır. Ayrıca koruyucu ve dekoratif kaplamalar ve elektro optik bileşenler, cam, metallerin kaplanmasında bu yöntem kolaylıkla kullanılmaktadır[3]. Düşük maliyetli güneş fotovoltaik uygulamalarında oksit ince filmler üretmek amacıyla bu yöntemden faydalanılmaktadır [4]. Diş hekimliğinde ve ortopedik cerrahide kullanılan titanyum alaşımı ve paslanmaz çeliğin üzerine sol-jel metodu ile çeşitli biyoaktif kaplamalar elde edilerek, bu kaplamaların karakterizasyonu ve gelişimi incelenmiş, ayrıca kaplanmış numuneler elektrokimyasal özellikleri ve biyoaktif tepkileri için in vitro olarak test edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, metalik malzemeleri korumak için biyoaktif parçacıkları içeren sol-jel koruyucu kaplamaların, kaplanmamış alt tabakadan daha fazla korozyona karşı dirençli olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca alt tabakadaki metalik iyonların kaplamayı geçemediği için metalik iyon salınımının büyük ölçüde engellendiği ve dokular üzerindeki zararlı etkilerin azaltıldığı belirtilmiştir. Çevre dokularında iyonların veya metal parçacıklarının zararlı etkisinin bulunmadığı için kaplamanın hem eski kemiğe (yeniden şekillendirme bölgesi) temas eden hem de kemik iliğinde (yeni kemik ile temas halinde) implantın çevresinde yeni kemiğin oluşumunu ve büyümesini arttırdığı görülmüştür [5]–[8]. Sol-jel yöntemi ile yapılan çalışmalarda araştırmacılar, genellikle kaplama yapılan tabakanın yüzey morfolojisi, mikroyapısı, optik özellikleri, sertlik ve yapışma özelliklerini incelemiştir [9-20].

Bu çalışmada, implant olarak kullanılacak Ti6Al7Nb titanyum alaşımı üzerine sol-jel daldırma yöntemiyle titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ve hidroksiapatit (HAP) kombinasyonu kaplamaların aşınma davranışı incelendi.

## Yöntem

Bu çalışmada, altlık malzemesi olarak kullanılan Ti6Al7Nb titanyum alaşımı plakalar, metalografik numune kesme cihazı kullanılarak 25×25×4 mm ebatlarında kesildi. Kullanılan altlık Ti6Al7Nb malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 1’de, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Tablo 2’de görülmektedir. Kaplama öncesi altlık malzemesinin kaplama yapılacak yüzeyi sırasıyla 180-240-400-600-800-1000 ve 1200 mesh’lik zımparalarla temizlendi. Daha sonra 3 µm boyutlu elmas pasta ile parlatıldı. Parlatılan numuneler saf su ve ardından alkol ile yıkandıktan sonra oda sıcaklığında kurutuldu.

**Tablo 1.** Ti6Al7Nb alaşımının kimyasal bileşimi (%)

Al	Nb	Ta	Fe	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	C	H <sub>2</sub>	Ti
5.5-6.5	6.5-7.5	<0.50	<0.25	<0.05	<0.20	<0.08	<0.009	Geri kalan

**Tablo 2.** Ti6Al7Nb alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellikleri	Değeri
Çekme mukavemeti (MPa)	1000
Akma mukavemeti (MPa)	900
% Uzama	12
% Kesit daralması	35
Elastisite modülü (GPa)	5
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	4.52

Çalışmada, altlık malzemesi olarak Ti6Al7Nb alaşımı, kaplama malzemeleri olarak ise Titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ve hidroksiapatit (HAP) kullanıldı. Sol-jel kaplamalarda kullanılmak üzere TiO<sub>2</sub> çözeltisi, HAP çözeltisi ve NaOH çözeltileri hazırlandı.

NaOH çözeltisi hazırlanmak için, 3 gr NaOH, 0.1 mmol HCl ve 50 ml saf su kullanılarak, manyetik karıştırıcıda karıştırılarak NaOH çözeltisi hazırlandı. TiO<sub>2</sub> çözeltisi hazırlamak için, 1 mmol Titanyum (IV) izopropoksit (C<sub>12</sub>H<sub>28</sub>O<sub>4</sub>Ti), 1 mmol dietanolamin (C<sub>4</sub>H<sub>11</sub>N<sub>2</sub>), 1 mmol saf su ve 26.5 mmol etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) manyetik karıştırıcıda 60 dakika boyunca karıştırılarak hazırlanan çözelti 24 saat süreyle oda sıcaklığında bekletilerek TiO<sub>2</sub> sol-jeli elde edildi. HAP çözeltisini elde etmek için ise, Etanol su karışımı solüsyonuna kalsiyum nitrat tetrahidrat (Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O) eklenerek çözünmesi sağlandı. pH 8 olana kadar amonyum fosfat ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>) çözeltisi eklendi ve sonra diamonyum hidrojen ortofosfat (NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) çözeltisi eklenerek elde edilen HAP çözeltisi 24 saat süreyle oda sıcaklığında bekletilerek HAP sol-jeli elde edildi.

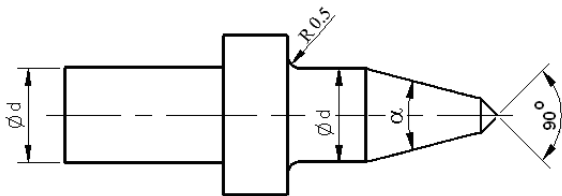
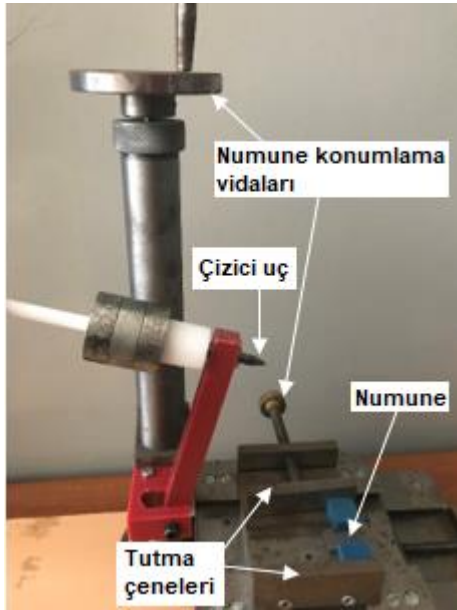
Altlık üzerine iki farklı kaplama yapılmış olup, birinci grup numuneler (A-grubu) ilk önce TiO<sub>2</sub> ile daha sonra HAP ile kaplanırken, ikinci bir grup numuneler (B-grubu) ise sadece TiO<sub>2</sub> ile kaplandı. Sol-gel kaplama işlemi yapılmadan önce, numuneler saf suda durularak 2 saat süreyle 200°C’de kurutuldu. Numuneler kaplama çözeltisine dik olarak daldırıldı. NaOH çözeltisi ile muamele edilen Ti6Al7Nb numunelerinden A1-B1 numuneleri 30 dak, A2-B2 numuneleri 60 dak ve A3-B3 120 dak daldırma sürelerinde, daldırma kaplama yöntemi ile TiO<sub>2</sub> sol-jel çözeltisi içerisinde bekletildikten sonra 2 mm/s’lik bir çekme hızı ile çekilerek TiO<sub>2</sub> film kaplamalar elde edildi. Elde edilen kaplamalar 30 dak süre ile oda sıcaklığında ve ayrıca 30 dak süreyle 80°C’de Nüve MF120 marka kül fırınında kurutuldu. Kurutulmuş örnekler daha sonra aynı fırında 10°C/dak sıcaklık artış hızıyla 400°C’de 10 dak süreyle kalsine edildi. TiO<sub>2</sub> kaplanmış bir grup numuneler, daha sonra tekrar sol-jel daldırma yöntemi kullanılarak HAP sol-jeli içerisine 10 dak süreyle daldırıldı ve 2 mm/s’lik bir çekme hızıyla HAP filmleri elde edildi.

Kaplama yüzeylerinin yüzey morfolojisi Nikon MA100 ters metal mikroskobu ve Clemex görüntü analiz sistemi kullanılarak incelenmiştir. SEM incelemeleri için ZEISS EVO MA 10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM)



kullanıldı. EDX analiziyle, kaplamada katı haldeki elementel yüzdeler belirlendi.

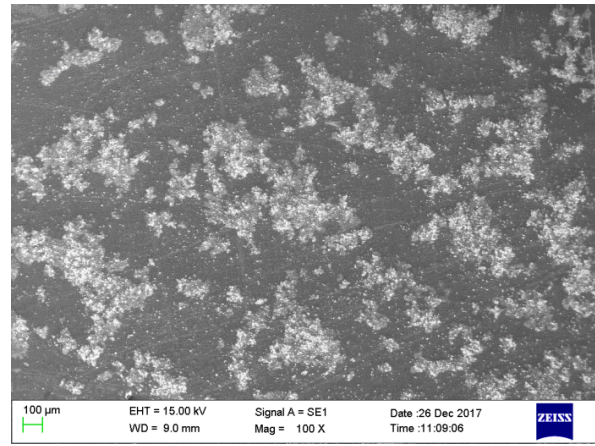
İnce film kaplamaların sertlikleri çizme sertliği cinsinden belirtilir. Sol-jel ince filmlerin mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla, çizilme testleri sabit normal yüklerle gerçekleştirildi. Çizilme testleri ASTM C1624-05 standardına uygun olarak yapıldı. Çizilme testi için, karbür bir uç kullanıldı. Çizilme testlerinde kullanılan test cihazı ve çizici uç geometrisi Şekil 1’de görülmektedir. Numuneler cihaz tablası üzerine düzgün bir şekilde yerleştirilerek sabitlendi. Daha sonra 1N ağırlığında sabit yük uygulanarak numuneler çizildi. Sabit yük testi daha fazla zaman gerektirir, ancak daha fazla istatistiksel güven sağladığı için tercih edilmektedir [21]. Çizilme testlerinden sonra her bir çizik, optik mikroskop ile incelenerek, numunelerin çizilme genişlikleri ölçüldü.



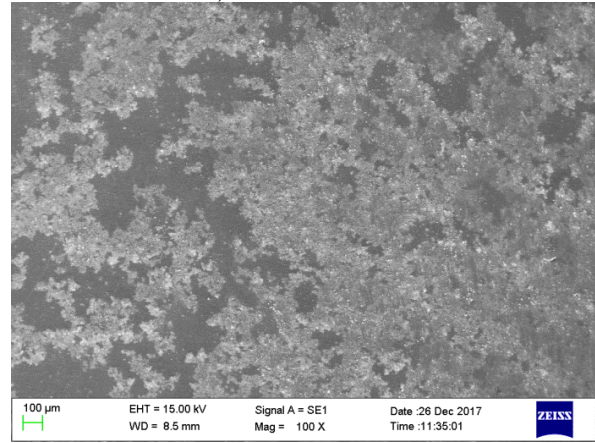
Şekil 1. Çizilme test cihazı ve çizici uç geometrisi

## Bulgular ve tartışma

A-grubu deney numunelerine ait Şekil 2’deki SEM fotoğrafları incelendiğinde, değişen daldırma süresiyle mikroyapıda birtakım değişikliklerin meydana geldiği gözlemlendi. Şekil 2’de, gri renkli bölgeler  $TiO_2$  kaplamaları temsil etmekte, açık renkli bölgeler HAP kaplamaları temsil etmekte ve koyu siyah bölgeler ise kaplama olmayan  $Ti6Al7Nb$  altlık malzemesini temsil etmektedir. Kaplamadaki katı haldeki elementel yüzdeler ise yapılan EDX analizleriyle tespit edilmiştir (Şekil 3).



a) Al numunesi



b) A3 numunesi

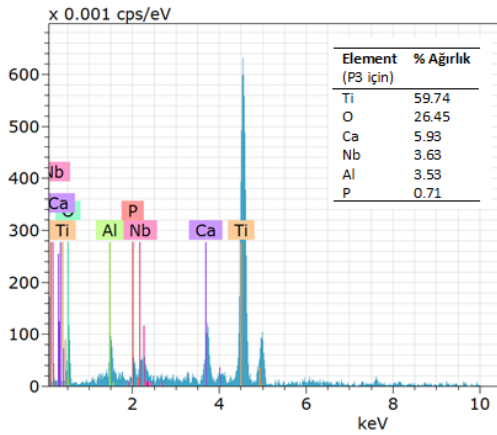
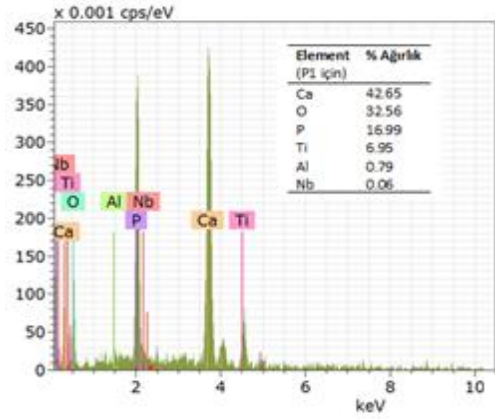
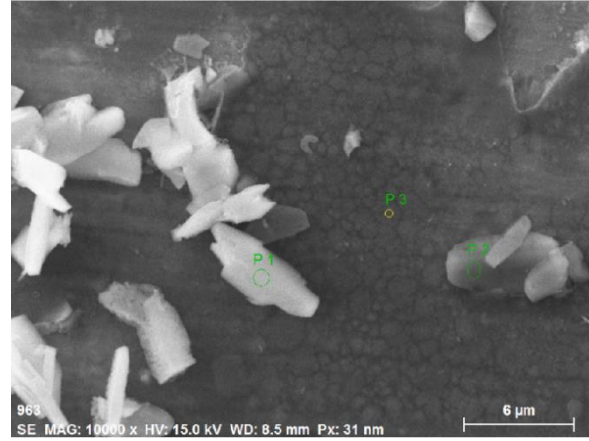
Şekil 2. A-grubu numunelere ait SEM görüntüsü

30 dakika süreyle  $TiO_2$  çözeltisine ve daha sonra 10 dak HAP çözeltisine daldırılan numunelerde, kaplamanın tam anlamıyla büyümeyerek altlığı kaplamadığı görüldü. Bu şartlar altında daldırma süresinin yetersiz olduğu kanaatine varıldı. Meydana gelen kaplamanın içeriğine bakıldığı zaman ise kaplama içerisindeki  $TiO_2$  miktarının

HAP'a oranla daha fazla olduğu, HAP'ın yeni yeni tutunmaya başladığı görülmüştür (Şekil 2a). Kaplama süresinin 120 dakikaya çıkarılmasıyla, daha kısa daldırma süresinde yapılan kaplamaya kıyasla daha homojen yapıda dağıldığı, kaplama içerisinde yine TiO<sub>2</sub> miktarının kaplamanın çoğunu oluşturduğu kaplama içerisinde HAP'ın ise homojen dağılmaya başladığı görüldü (Şekil 2b). A-grubu numunelerde, kaplama süresinin artmasıyla TiO<sub>2</sub> miktarının arttığı ve üstüne kaplanan HAP'ın ise daha yoğun bir yapıda yayılım gösterdiği tespit edilmiştir [11].

Yüzeyde oluşturulan TiO<sub>2</sub> tabaka implant yada protez olarak kullanılacak metalik biyomalzemeler için çok önemlidir. Çünkü yüzeyde oluşturulan bu tabaka metal biyomalzeme ile doku arasındaki teması keserek zamanla dokuya metal iyonları geçişini engelleyen bir bariyer görevi yapacaktır. Böylelikle metal iyonlarının dokuya geçişinden dolayı hem metalik biyomalzeme mukavemet açısından zayıflamayacak hem de dokuda bozunmalar, toksik etkiler meydana gelmeyecektir [8].

Şekil 3'te P1 ile gösterilen bölgede, Ca ve P oranının yüksek olması bu bölgelerin HAP bölgeleri olduğunu göstermektedir. Şekil 3'teki P1 ve P2 bölgeleri kimyasal içerik açısından yakın sonuç verdiği için P2 bölgesine ait EDX grafiği burada verilmemiştir. Yani P2 bölgesi de HAP yönünden zengin bir bölgedir. Ayrıca Şekil 3'te P3 ile gösterilen bölgede ise Ti ve O miktarı Ca ve P oranına göre daha fazladır. Bu nedenle bu bölgeler TiO<sub>2</sub> varlığına işaret etmektedir. Her üç noktanın EDX analizindeki grafiklerde görülen Ti, Nb, Al içerikleri altlık malzemesi olan Ti6Al7Nb'dan kaynaklanmaktadır.



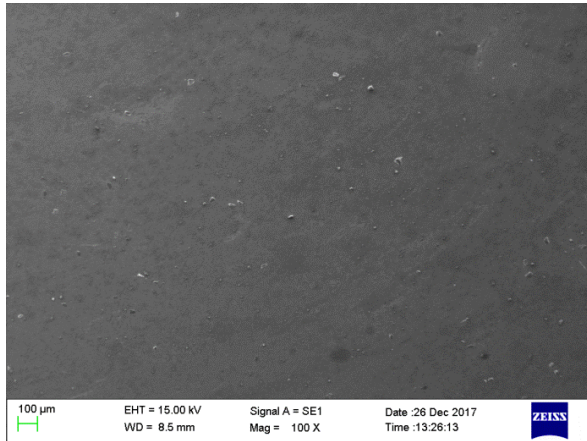
Şekil 3. A2 numunesindeki farklı bölgelerin EDX analizi

Şekil 4'deki B-grubu numuneler sol-jel daldırma yöntemi kullanılarak, 30, 60 ve 120 dak sürelerde sadece TiO<sub>2</sub> ile kaplanmıştır. B-grubu numunelere ait SEM mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, kaplama süresi arttıkça yüzeyde TiO<sub>2</sub> varlığının arttığı görülmüştür. Sol-jel çözeltilisine daldırma süresi 30 dak seçildiğinde (B1 numunesi), SEM görüntülerinde altlık üzerinde TiO<sub>2</sub> tabakası bazı bölgelerde oluşmaya başlamış ama daldırma süresinin kısa

olmasından dolayı hazırlanan jel, altlığın tüm yüzeyine tutunamamıştır (Şekil 4a). Daldırma süresini 120 dakikaya çıkarıldığı B3 numunelerin SEM görüntülerin Ti6Al7Nb altlık malzemesinin tüm yüzeyinin TiO<sub>2</sub> ile kaplandığı görüldü (Şekil 4b).



a) B1 numunesi

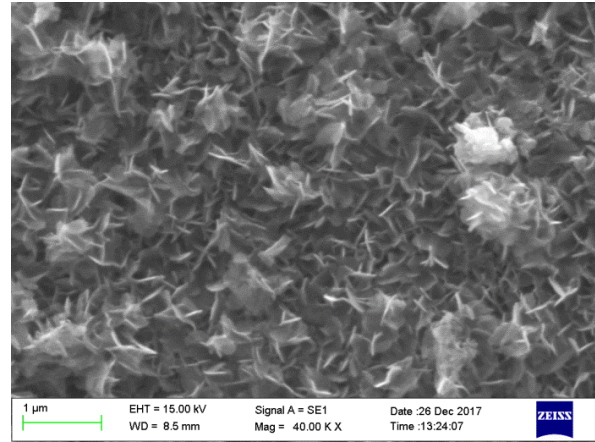


b) B3 numunesi

Şekil 4. B-grubu numunelere ait SEM görüntüsü

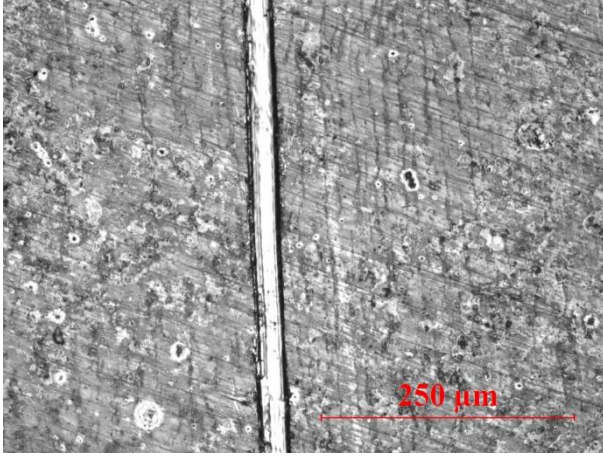
TiO<sub>2</sub> ile sol-jel daldırma kaplama yapılan deneylerde, 120 dak bekleme süresinin yüzeyin tamamen kaplanıp jelin büyümesi için 30 dak ve 60 dak'ya göre daha uygun bir süre olduğu kanaatine varıldı. TiO<sub>2</sub> kaplama tabakasının daldırma süresinden büyük ölçüde etkilendiği görüldü. Daldırma süresinin artırılmasıyla altlığa tutunan yüzeyler artmakla birlikte, yüzeyde TiO<sub>2</sub> kristalize partikülleri ile beraber TiO<sub>2</sub> ağ yapısının meydana geldiği görüldü (Şekil 5). Oluşan bu yapı gözenekli yapı oluşumunu işaret etmektedir. İmplant içerisindeki gözenekli kısımlar biyomalzemenin doku ilerlemesine

müsaade ettiği için dokunun biyomalzeme kabul etmesi açısından çok önemlidir. Biyomalzeme yüzeyinin bu şekilde morfoloji sunması kemik üreten hücrelerin oluşmasında nükleasyonların birikmesini olumlu yönde etkiler. Böylece kemiğin osteointegrasyonu (kemik tümleşimi) kolaylaşır [8].

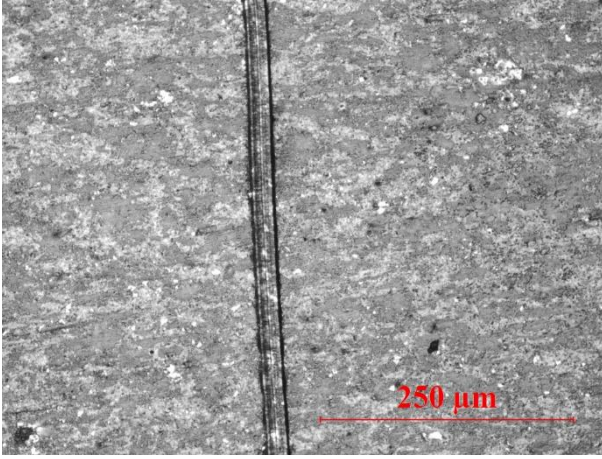


Şekil 5. B1 numunesinde oluşan ağ yapısına ait SEM görüntüsü

Şekil 6 ve Şekil 7'deki optik görüntüler, sol-jel ince filmlerinin çizilme testleri sonrası meydana gelen çizik görüntüleridir. Kaplama süresinin çizilme genişliği üzerinde etkisi ise Şekil 8'da görülmektedir. 1N yük altında, kaplama süresi arttığında A-grubu numunelerde kaplama süresinin artmasıyla çizilme genişliğinin arttığı görüldü. Yani çizilmeye karşı direnç artan kaplama süresiyle birlikte azalmıştır. B-grubu numunelerde ise kaplama süresinin 60 dak'ya çıkarılmasıyla çizilme genişliğinin düştüğü, 120 dak'ya çıkarılmasıyla çizilme genişliğinin arttığı görüldü. Yani çizilmeye karşı direnç önce artmış daha sonra azalmıştır.



Şekil 6. A2 numunesine ait çizimin optik görüntüsü X200

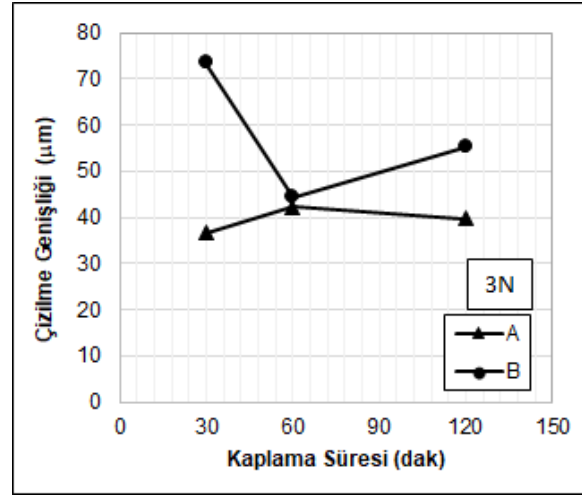
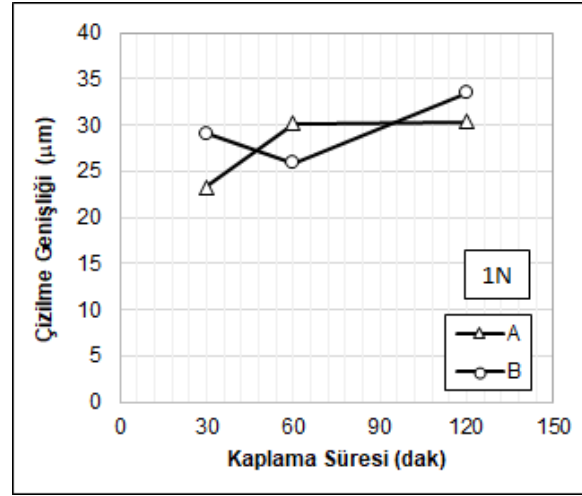


Şekil 7. B2 numunesine ait çizimin optik görüntüsü X200

Kaplanmış numuneler 3N yük uygulanarak çizilme testine tabi tutulduğunda ise, A-grubu numunelerde kaplama süresinin 60 dakikaya çıkarılmasıyla çizilme direncinin düştüğü, 120 dakikaya çıkarılmasıyla ise çizilme direncinin arttığı görülmüştür. B-grubu numunelerde ise, kaplama süresinin 60 dakikaya çıkarılmasıyla, çizilme direncinin arttığı, 120 dakikaya çıkarılmasıyla ise çizilmeye karşı direncin bir miktar azaldığı görülmüştür.

Şekil 8'deki grafikler genel olarak değerlendirilecek olursa, 60 dakikalık TiO<sub>2</sub> kaplama süreleri hariç A-grubu numunelerin B-grubu numunelere göre aşınmaya daha dirençli olduğu görülmektedir. Bu durum ise, TiO<sub>2</sub> kaplama sonrası A-grubu numuneler üzerine ikincil tabaka olarak kaplanan HAP kaplamanın

aşınma direncini artırmada olumlu yönde etkisi olduğu ile açıklanabilir.



Şekil 8. Çizilme genişliğinin kaplama süresine göre değişimi

## Sonuçlar

A ve B-grubu numunelerde, daldırma süresi arttıkça yüzeydeki TiO<sub>2</sub> yapısının arttığı tespit edilmiştir. A-grubu numunelerde TiO<sub>2</sub> kaplama tabakası üstüne sabit daldırma süreli HAP kaplamalarda, HAP miktarında bariz bir değişiklik söz konusu olmadığı ve HAP yapısının homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür.

Yüzeyde oluşturulan TiO<sub>2</sub> yapısı metal biyomalzeme ile doku arasındaki teması keserek zamanla dokuya metal iyonları geçişini engelleyen bir bariyer görevi yapacaktır [8]. Böylelikle metal iyonlarının dokuya geçişinden dolayı hem metalik biyomalzeme mukavemet

açısından zayıflamayacak hem de dokuda bozunmalar, toksik etkiler meydana gelmeyecektir. Yüzeyde TiO<sub>2</sub> kristalize partikülleri ile beraber TiO<sub>2</sub> ağ yapısının meydana geldiği ve bu yapının gözenekli olduğu gözlemlendi. TiO<sub>2</sub> ve HAP'ın yapısının morfolojik olarak pürüzlü ve gözenekli olması biyomalzemenin doku ilerlemesine müsaade eder.

A-grubu numunelerin B-grubu numunelere göre 60 dakikalık TiO<sub>2</sub> kaplama süresi hariç aşınmaya daha dirençli olduğu görülmektedir. Bu durum ise, TiO<sub>2</sub> kaplama sonrası A-grubu numuneler üzerine ikincil tabaka olarak kaplanan HAP yapısına atfedilmiştir.

### Teşekkür

Bu çalışması Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAP) tarafından MF.17.45 nolu proje olarak desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı FÜBAP'a teşekkür ederiz.

### Kaynaklar

- [1] Ö. Akdemir, "Aşımli beyaz dökme demirlerin mikroyapı analizi ve aşınma özellikleri / Microstructure analysis and wear properties of alloyed white cast irons," İstanbul Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, 1994.
- [2] C.J. Brinker; G. W. Scherer, *Sol-gel science: The physics and chemistry of sol-gel processing*. Academic Press, Inc., 1990.
- [3] J. D. (John D. Wright and N. A. J. M. Sommerdijk, *Sol-gel materials: chemistry and applications*. Gordon and Breach Science Publishers, 2001.
- [4] B. O'Regan and M. Grätzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films," *Nature*, vol. 353, no. 6346, pp. 737–740, Oct. 1991.
- [5] J. Ballarre, I. Manjubala, W. H. Schreiner, J. C. Orellano, P. Fratzl, and S. Ceré, "Improving the osteointegration and bone-implant interface by incorporation of bioactive particles in sol-gel coatings of stainless steel implants," *Acta Biomaterialia*, vol. 6, no. 4, pp. 1601–1609, Apr. 2010.
- [6] M. H. Fathi and A. Doost Mohammadi,

- "Preparation and characterization of sol-gel bioactive glass coating for improvement of biocompatibility of human body implant," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 474, no. 1–2, pp. 128–133, Feb. 2008.
- [7] S. Höhn and S. Virtanen, "Biocorrosion of TiO<sub>2</sub> nanoparticle coating of Ti-6Al-4V in DMEM under specific in vitro conditions," *Applied Surface Science*, vol. 329, pp. 356–362, Feb. 2015.
- [8] A. Büyüksağış, "The Coating of Hydroxyapatite ( HAP ) on 316L Stainless Steel and Ti6Al4V Alloy use by Sol-Gel Method," *Electronic Journal of Machine Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 1–11, 2010.
- [9] M. Z. Atashbar, H. T. Sun, B. Gong, W. Wlodarski, and R. Lamb, "XPS study of Nb-doped oxygen sensing TiO<sub>2</sub> thin films prepared by sol-gel method," *Thin Solid Films*, vol. 326, no. 1–2, pp. 238–244, Aug. 1998.
- [10] İ. Türhan, "TiO<sub>2</sub> ve katkılı TiO<sub>2</sub> ince filmlerinin hazırlanması ve karakterizasyonu," İstanbul Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.
- [11] R. Azari, H. R. Rezaie, and A. Khavandi, "Investigation of functionally graded HA-TiO<sub>2</sub> coating on Ti-6Al-4V substrate fabricated by sol-gel method," *Ceramics International*, 2019.
- [12] S. F. Robertson, A. Bandyopadhyay, and S. Bose, "Titania nanotube interface to increase adhesion strength of hydroxyapatite sol-gel coatings on Ti-6Al-4V for orthopedic applications," *Surface and Coatings Technology*, 2019.
- [13] T. Wen, J. Gao, J. Shen, and Z. Zhou, "Preparation and characterization of TiO<sub>2</sub> thin films by the sol-gel process," *Journal of Materials Science*, vol. 36, no. 24, pp. 5923–5926, Dec. 2001.
- [14] M. A. Hamid and İsmail Ab. Rahman, "Preparation of Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) thin films by sol gel dip coating method," *Malaysian Journal of Chemistry*, vol. 5, no. 1, pp. 086–091, 2003.
- [15] R. . Zoppi, B. . Trasferetti, and C. . Davanzo, "Sol-gel titanium dioxide thin films on platinum substrates: preparation and characterization," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 544, pp. 47–57, Mar. 2003.
- [16] T. Miki, K. Nishizawa, K. Suzuki, and K. Kato,

- “Preparation of nanoporous TiO<sub>2</sub> film with large surface area using aqueous sol with trehalose,” *Materials Letters*, vol. 58, no. 22–23, pp. 2751–2753, Sep. 2004.
- [17] S. Sönmezolu, A. Arslan, T. Serin, and N. Serin, “The effects of film thickness on the optical properties of TiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> compound thin films,” *Physica Scripta*, vol. 84, no. 6, Dec. 2011.
- [18] R. Mechiakh, N. Ben Sedrine, and R. Chtourou, “Sol-gel synthesis, characterization and optical properties of mercury-doped TiO<sub>2</sub> thin films deposited on ITO glass substrates,” *Applied Surface Science*, vol. 257, no. 21, pp. 9103–9109, Aug. 2011.
- [19] M. Catauro, F. Bollino, F. Papale, S. Marciano, and S. Pacifico, “TiO<sub>2</sub>/PCL hybrid materials synthesized via sol-gel technique for biomedical applications,” *Materials Science and Engineering C*, vol. 47, pp. 135–141, Feb. 2015.
- [20] C. Domínguez-Trujillo *et al.*, “Sol-gel deposition of hydroxyapatite coatings on porous titanium for biomedical applications,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 333, pp. 158–162, Jan. 2018.
- [21] S. Kuiry, “Advanced Scratch Testing for Evaluation of Coatings,” 2012.

## Microstructure and Wear Behavior of TiO<sub>2</sub> and HAP Coated Ti6Al7Nb Alloy by Sol-Gel Method

### Extended abstract

*Surface coating is the process of coating the main material surface with another substance with different characteristics and chemical composition in order to obtain a new surface layer. It is applied so as to improve physical, chemical and mechanical features such as viscosity, wettability, optical properties, corrosion resistance, impact resistance, wear resistance, scratch resistance, etc. and to fix the original or broken pieces. Coating is carried out with liquid, gas or solid substances. Sol-gel method as a coating technique has a substantial place in practice. It is preferred for it has some advantages when compared to other coating methods. Among these advantages are that it makes it possible to save energy by preparing homogenous and pure films in low heat, to coat materials in different geometrical shapes homogeneously, avoid waste and contamination. Sol-gel method is safe unless there is a problem with the chemicals. The micro-structure of the coated film can be easily controlled. It is possible to obtain films with low refractive index because the structure becomes porous. Moreover, a multilayer coating is accomplishable and the method is not limited to the geometry of the material. There are a few disadvantages of sol-gel method along with the advantages. The high amount of material waste, high costs when a rare chemical is used, carbon solution left on the films and insanitariness of the chemicals used, small pores that are left and the long coating time is among the disadvantages.*

*In this study, the microstructures and wear behaviors of coatings performed on Ti6Al7Nb titanium alloy to be used as an implant performed in different solution retention times (30, 60 and 120 min) by sol-gel immersion method were investigated. In the study, Ti6Al7Nb alloy is used as the substrate material and the titanium dioxide*

*(TiO<sub>2</sub>) and hydroxyapatite (HAP) are used as the coating material also. Two different coatings were made, while the first group of samples were coated with TiO<sub>2</sub> only, while a second group of samples were coated first with TiO<sub>2</sub> and then with HAP. In order to determine the mechanical properties of the coated specimens, scratch tests were carried out to investigate the wear behavior. Microstructure investigations of the prepared coatings were examined under optical microscope and SEM, solid state elemental fractions were determined by EDX analysis.*

**Keywords:** Sol-Gel, TiO<sub>2</sub>, HAP, Microstructure, Wear

## Alüminyum Alaşımli Otomobil Jantlarında Deneysel Darbe Testlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrulanması

### *Validation of Experimental Impact Tests on Aluminum Alloy Car Wheels using the Finite Element Method*

Emrah AYRAN<sup>1,2</sup>, Mahmut PEKEDİS<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir, emrah.ayran@maxionwheels.com, mahmut.pekedis@ege.edu.tr

<sup>2</sup> Maxion İnci Jant Sanayi A. Ş, Manisa, emrah.ayran@maxionwheels.com

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*

Geliş: 26 Kasım 2019  
Düzeltilme: 11 Mart 2020  
Kabul: 23 Mayıs 2020

*Anahtar kelimeler:*

Alüminyum alaşımli jant, sonlu elemanlar yöntemi, şekil değişim hızı, Johnson-Cook malzeme modeli, darbe testi.

#### ÖZET

Jantlar için gerçekleştirilen sanal gerçekçi simülasyonların hassasiyeti, ağırlıklı olarak üretim sürecinde karşılaşılan değişken faktörlerin analizlere dahil edilmesine bağlıdır. Buna ek olarak, şekil değiştirme hız etkisi de simülasyon gerçekliğini etkileyen bir diğer faktördür. Burada, bu etkiyi malzeme modellerine dâhil edip daha doğru analizlerin gerçekleştirilmesini hedefliyoruz. Başlangıçta jantlardan çıkartılan çekme testi numuneleri 0.1, 1, 10, 100 ve 600 mm/dk'lık şekil değişim hızlarında test edilip elde edilen ölçümler, Johnson-Cook malzeme modelinde işlenerek malzeme katsayıları bulunmuştur. Sonra, standart olarak kullanılan malzeme katsayıları ile şekil değişim hız etkisini içeren bu katsayılar jant darbe analizlerine dâhil edip simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve her ikisinin sonucu deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Farklı şekil değiştirme hızında test edilen numunelerdeki akma ve kopma gerilmelerinin 10 mm/dk' daki hızla maksimum değerlere ulaştığı gözlenmiştir. Elden edilen sonuçlardan, şekil değişim hızı etkisinin tanımlandığı simülasyonların deneysel darbe verileriyle daha uyumlu olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, şekil değişim hızının nümerik sonuçlar üzerinde etkili olduğu ve daha gerçekçi simülasyonlar elde edilmesi için bunların bünyesel malzeme modeline katılması gerektiği çıkarımı yapılmıştır.

*Doi: 10.24012/dumf.651318*

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 26 December 2019  
Revised: 11 March 2020  
Accepted: 23 May 2020

*Keywords:*

Aluminum alloy wheels, finite element method, strain rate, Johnson-Cook material model, impact test

#### ABSTRACT

The sensitivity of realistic simulations carried out for car wheels are heavily dependent on whether the variable factors encountered during manufacturing are included into the analysis. Additionally, the strain rate is also one another factor that affects the reality of the simulation. Here, we aim to perform more accurate analysis by incorporating the strain rate effect into the material model. Initially, tensile test specimens that extracted from the wheels are tested at various strain rates such as 0.1, 1, 10, 100 and 600 mm/min to determine material parameters by processing the measurements in Johnson Cook material model. Then, numerical analyses are carried out for the wheels to simulate the impact test for two material models which the 1st includes the strain rate effect, while the 2nd does not. It is observed that the tensile and failure stresses have reached the maximum values for the tensile specimens tested at various strain rates. The results have shown the simulations that performed with strain rate effects are in more agreement with experimental impact data. As a result, it is concluded that the strain rate affects the numerical data which shows that it should be included in constitutive material model to obtain more realistic simulations.

\* Sorumlu yazar / Correspondence  
Mahmut PEKEDİS  
✉ mahmut.pekedis@ege.edu.tr



## Giriş

Jant, halk arasında her ne kadar görseiliğin ön planda tutulduğu bir parça olarak yorumlansa da, aslında bu görseiliğinin yanında araçtaki en önemli emniyet parçalarından birisidir. Otomotiv endüstrisindeki en önemli konulardan birisi yakıt tüketimini azaltma çalışmalarıdır. Yakıt tüketimini azaltmak için de araçlarda daha hafif malzemeler kullanılmaya başlanmış ve ağırlık azaltma çalışmaları üzerine yoğunlaşmıştır. Ağırlığın azaltılmasının yanında güvenlikten de ödün verilmemesi gerektiğinden, otomotiv endüstrisi düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli malzemelere yönelmiştir. Alüminyum alaşımlarının hafif ve yüksek mukavemetli olmasının yanında farklı özelliklerinin de olması bu alaşımın jant endüstrisinde kullanılması birçok avantajı da beraberinde getirmiştir. Yeni bir jant tasarımı yapılırken göz önünde bulundurulması gereken bazı noktalar vardır. Öncelikle jantın, belirlenen araç yükünü karşılayabilecek mukavemete sahip olması gerekmektedir. Dayanıklılığın yanı sıra hafiflik de çok önemli bir koşuldur. Bu nedenle jantın yük taşımayan bölgelerine ağırlığı azaltmak için çeşitli boşaltmalar da tasarlanabilmektedir. Tüm bunların yanında jant, birlikte araca monte edilecek diğer parçalarla (bijon, porya, lastik vb.) da uyumlu olması gerekmektedir. Aynı şekilde jantın çalışma koşullarında da yeterli dayanım koşullarını sağlaması gerekir.

Hâlihazırda, jantlara ilişkin geliştirme sürecinde farklı mekanik performans testleri uygulanmaktadır [1-3]. Jantların, gerçek ortamda maruz kalabilecekleri yanal darbelere karşı dayanımları "13° darbe testi", viraj boyunca üzerlerinde oluşan kuvvetler "köşe yorulma testi" ve dönme aşamasında oluşan kuvvetler "radyal yorulma testi" ile belirlenir [1-4]. Ancak bu testler çoğu zaman maliyetli ve bazen uzun süre alabilmektedir [5, 6]. Diğer taraftan bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler, daha hızlı ve gerçekçi sayısal simülasyonların gerçekleştirilmesine olanak sağlayıp son zamanlarda jant endüstrisinde de yansımaları olmuştur [6, 8]. Bu sayısal simülasyonlar da çözücü olarak yaygın olan sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılmaktadır. Bu yöntem

kullanılarak alüminyum alaşımlı jantlarda uygulanan 13°lik darbe testinin simülasyonları birkaç çalışmada sunulmuştur [6-8]. Yine bir başka çalışmada, 90°lik darbe testi SEY ile analiz edilip Von Mises gerilme sonuçları zamana bağlı olarak verilmiştir [5]. Diğer taraftan SEY'den elde edilen simülasyonların hassasiyeti, uygulanan analiz tipi (statik, implicit-explicit dinamik), ağ (quad, hex vb.) malzeme modeli (lineer, lineer olmayan, şekil değişim hızı vb.) ve sınır koşulları gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Özellikle darbe veya çarpışma testlerinde, şekil değişim hızı etkisinden dolayı malzemenin sergilemiş olduğu mekanik davranış değişmekte ve bunun malzeme modeline dahil edilmesi gerekir [9-11]. Ancak, bu faktörün literatürde sunulan çalışmalarda ihmal edildiği görülmüştür [5-8]. Bu çalışmada deneysel olarak elde edilen şekil değişim hız parametrelerinin malzeme modeline katarak daha gerçekçi analizlerin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

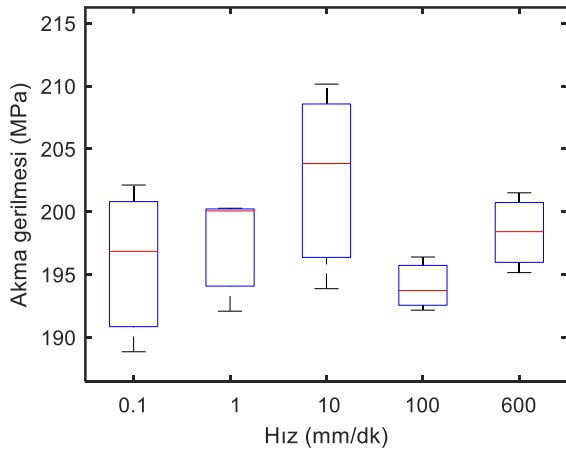
Çalışmanın akışı şu şekildedir. Önce, jantta kullanılan malzemeye ilişkin mekanik karakterizyondan bahsedilir. Sonra, deneysel ölçümlerin Johnson Cook modeli ile işlenmelerine ve malzeme katsayılarının belirlenmesine yönelik teknik açıklanır. En sonunda da simülasyon ve test sonuçları değerlendirilip birbirleriyle karşılaştırılır.

## Malzemenin mekanik karakterizasyonu

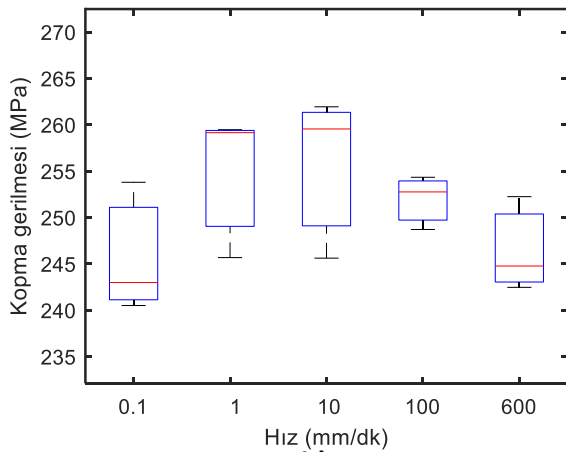
Başlangıçta, A356 alaşımlı malzemedan üretilen jantın 5 kritik feder bölgesinden (yaygın olarak hasarın oluştuğu kısımlar) 3'er numune çıkarılıp farklı hızlarda çekme testlerine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Bu numunelerin çapı 5 mm ve gauge boyu ise 33 mm'dir. Aynı şartlar altında ve sıralı olarak dökülen bu jantların, aynı çekme hızındaki test sonuçları arasında Şekil 1'de verildiği üzere az da olsa bir değişkenlik gözlenmektedir.

Tablo 1. Çekme testi sonuçları

Çekme hızı (mm/dk)	Numune no	Akma gerilmesi (MPa)	Kopma gerilmesi (MPa)	Birim şekil değişimi (%)
0.1	1	196.84	253.81	4.38
	2	202.12	243	2.27
	3	188.85	240.52	3.21
1	1	200.06	259.48	3.96
	2	192.08	245.69	3.47
	3	200.27	259.16	4.20
10	1	203.83	259.56	3.74
	2	210.15	261.95	2.88
	3	193.87	245.63	2.47
100	1	192.16	254.35	3.53
	2	196.39	252.77	2.77
	3	193.72	248.72	2.87
600	1	198.41	242.48	2.76
	2	195.15	252.26	3.59
	3	201.50	244.78	2.77



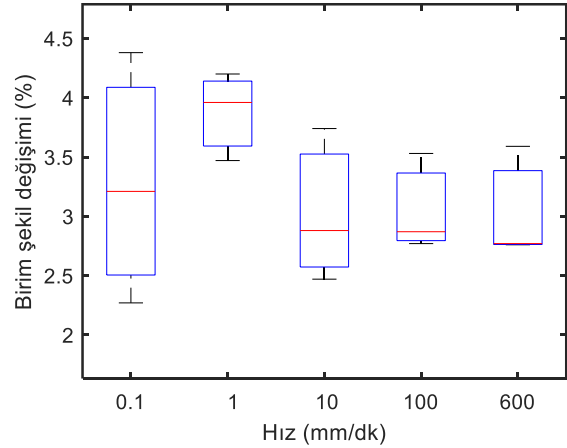
a)



b)

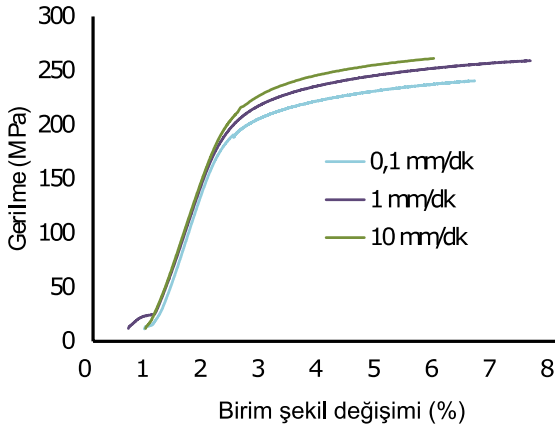
Şekil 1. Çekme hızına bağlı olarak elde edilen malzeme özelliklerinin kutu grafiğindeki dağılımları, a) Akma gerilmesi, b) Kopma gerilmesi (Kırmızı çizgi medyanı gösterir)

Çok düşük uzama değerleri görülen numuneler incelendiğinde, numune çıkarılan bölgede döküm boşluğu gözlenmiş ve bu kopmayı hızlandırmıştır. Bu değişkenlik döküm yönteminden ve jant tasarımından kaynaklanmaktadır. Dökümde; dolumu ve katılaşmayı etkileyen her türlü faktör jantın mekanik özelliklerine etki etmektedir. Bu faktörler de çok fazla olduğu için bu değişkenlik belli oranda görülebilmektedir. Akma ve kopma gerilmesi açısından karşılaştırıldığında, 10 mm/dk hıza kadar artış sonrada düşüş gözlenmiştir (Şekil 1). Maksimum birim şekil değişimi ise 1 mm/dk hızında gerçekleşmiştir (Şekil 2). Gruplar içerisinde farklılıklar görülmüş ve bu amaçla medyan bölgesinde kalan numuneler seçilip malzeme modellerinde kullanılmıştır.



Şekil 2. Çekme hızına bağlı olarak elde edilen birim şekil değişim verilerinin kutu grafiğindeki dağılımları, (Kırmızı çizgi medyanı gösterir)

Seçilen numunelere ilişkin gerilme-şekil değişimi grafikleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu grafikten görüldüğü üzere çekme hızı arttıkça akma ve kopma gerilmesi artmaktadır.



Şekil 3. Farklı çekme hızlarına bağlı olarak elde edilen gerilme-şekil değişimi

### Johnson Cook malzeme modeli

Bu malzeme modeli, malzemenin akma gerilmesini, pekleşme özelliklerini, şekil değiştirme, şekil değiştirme hızını ve yüksek sıcaklıktaki davranışını ifade eden bağıntıdır.

Johnson Cook modelinde gerilme açık bir formda aşağıdaki biçimde olduğu kabul edilmektedir [11]:

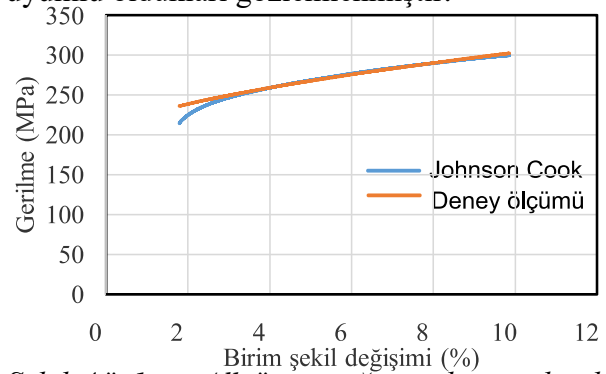
$$\sigma = (a + b\varepsilon_p^n) \left( 1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_n} \right) \left( 1 - (\hat{T})^m \right) \quad (1)$$

Üstteki eşitlikle;  $a$  akma gerilmesi,  $b$  plastik pekleşme parametresi,  $n$  plastik pekleşme üstü,  $c$  şekil değişim hız katsayısı,  $\dot{\varepsilon}$  şekil değişim hızı,  $\dot{\varepsilon}_0$  referans şekil değişim hızı,  $T^*$  sıcaklık etkisi ve  $m$  ise sıcaklık üssüdür. Johnson-Cook hasar modelinde şekil değişimi ise,

$$\varepsilon_f = \left( D_1 + D_2 \exp \left( D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}} \right) \right) \left( 1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_n} \right) \left( 1 + D_5 (\hat{T})^m \right) \quad (2)$$

ile ifade edilip  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  ve  $D_5$  hasar parametreleri,  $\sigma_m$  ortalama gerilme,  $\sigma_{vm}$  von-mises gerilmesi,  $\dot{\varepsilon}$  şekil değişim hızı,  $\dot{\varepsilon}_0$  referans şekil değişim hızı ve  $T^*$  ise sıcaklık etkisidir [11]. Sözü geçen bu  $D$  parametreleri, deneysel verilerin Denklem 2'de gösterilen denkleme uygulanıp eğri uydurma tekniğiyle belirlenir. Burada, sıcaklığın etkisi dâhil edilmediğinden  $D_5 = 0$  olur.

Başlangıçta, referans şekil değişim hızı olan 1 mm/dk için ( $\dot{\varepsilon}_0 = \dot{\varepsilon}$ ) hesaplama yapılmıştır. Dolayısıyla şekil değişim hızı katsayısı olan  $c$  değerinin etkisi ortadan kalkmıştır. Çekme testinden elde edilen ölçümlerin Johnson Cook malzeme modelinde eğri uydurma sonucu sonucu  $a = 200.06$  MPa,  $b = 414.65$  MPa ve  $n = 0,604979$  şeklinde bulunmuştur. Aynı yöntem hasar modeli için uygulandığında  $D_1 = (0,0396)$ ,  $D_2 = (0,1)$  ve  $D_3 = (-20)$  olarak elde edilmiştir. Deneysel ölçüm ile modelden elde edilen değerler, Şekil 4'de verildiği üzere özellikle % 2.5'ten büyük şekil değişimleri için birbirleriyle uyumlu oldukları gözlemlenmiştir.



Şekil 4. " 1 mm/dk " için eğri uydurma ile elde edilen Johnson-Cook malzeme model eğrisi ile deneysel ölçüm eğrisi

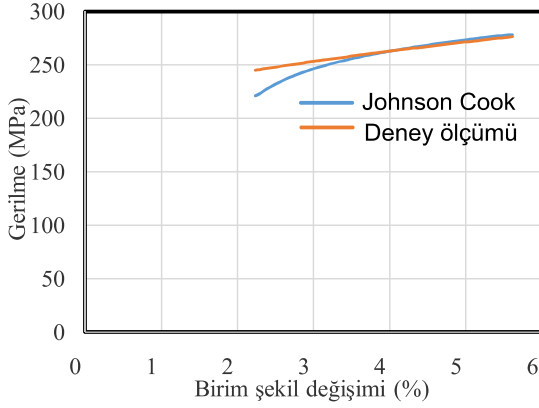
Şekil değişim hız etkisini işlemlere dahil etmek için  $c$  katsayısının belirlenmesi gerekir. Bu amaçla, 1 mm/dk hız ile yapılmış çekme testinin ham verilerinden elde edilen  $a$ ,  $b$  ve  $n$  değerleri 10 mm/dk hız ile yapılmış bir başka testinin ham verileriyle oluşturulmuş gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme grafiğinin üzerine yerleştirilir. Bu işlemde şekil değişim hızı faktörü olan  $c$  katsayısının etkisi gözlenir. Şekil 5'de eğri yerleştirme işlemi sonucunda elde edilen yeni eğri gösterilmiştir. Aynı işlemler diğer hızlar ve hasar modeli için gerçekleştirilmiş ve nihai olarak elde edilen Johnson Cook parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Malzemenin yoğunluğu  $2700 \text{ kg/m}^3$  ve çekme testinden hesaplanan elastisite modülü ise  $77.8 \text{ GPa}$ 'dır.

Tablo 2. Şekil değişim hızı etkisinin dikkate alınması sonucu hesaplanan malzeme modeli katsayıları

$a$ (Pa)	$b$ (Pa)	$n$	$c$
200060000	414659259	0,604979	0,059651

Tablo 3. Şekil değişim hızı etkisinin dikkate alınması sonucu hesaplanan malzeme hasar modeline ilişkin katsayılar

D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>
0,0396	0,1	-20	0,01



Şekil 5. "10 mm/dk" için eğri uydurma ile elde edilen Johnson-Cook malzeme model eğrisi ile deneysel ölçüm eğrisi

### Darbe testi ve sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulama

Darbe testi alüminyum alaşımlı jantların, maruz kalabileceği yanal darbelere karşı dayanımlarını belirlemek için uygulanan tahribatlı bir yöntemidir. Araç yükü de göz önünde bulundurularak, jantın kırılmaya karşı yeterli direnç göstermesi gerekir. Jant, test cihazına yer eksenine ile 13 derece açı yapacak şekilde bir flanş yardımı ile bağlanır. Sonra, rijit bir plaka 230 mm yüksekten jant üzerine serbest bırakılmasıyla test tamamlanır (Şekil 6).

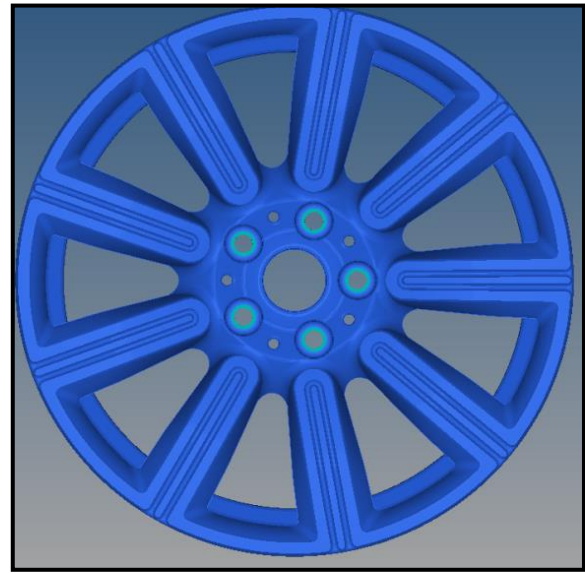


Şekil 6. Darbe testi

Jantların feder bölgeleri simetrik bir yapıdadır ancak göbek bölgesi federlere göre simetrik

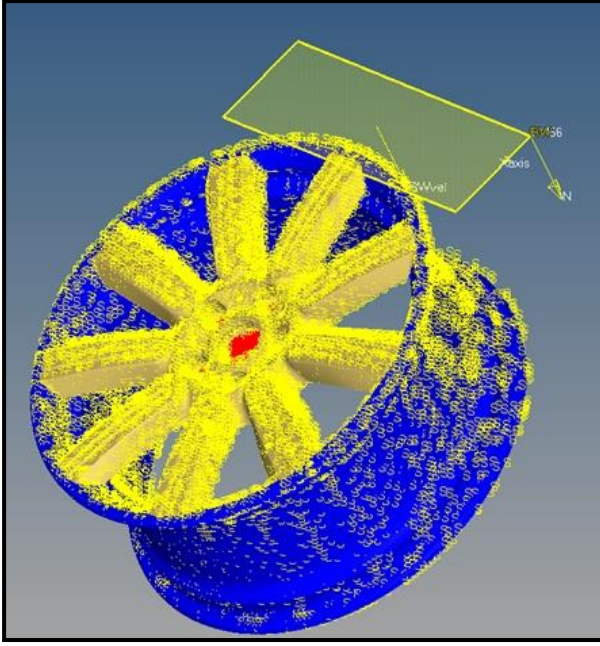
değildir. Bu nedenle jant modelinde göbek bölgesi ve feder bölgesinin ağ yapısı, geometrik olarak birbirinden ayrılmış ve bu şekilde ağ hazırlanmıştır.

Jant ölçüleri 6J x 17'dir. Model üzerinde, jantın yük taşıyan bölgelerinde 1.9 mm, diğer bölgelerinde ise 2.5 - 5 mm uzunluğunda piramit (tetrahedral) elemanlar kullanılarak ağ yapısı örülmüştür. Modelin tamamı 1397198 adet üç boyutlu elemandan oluşmaktadır. Jant modeline ilişkin tüm ağ yapısı Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Jant modeline ilişkin sonlu elemanlar ağı

Sonlu elemanlar jant modeli, gerçek testteki gibi yer eksenine ile 13 derece bir açı olacak şekilde düzenlenip bijon ise yüzey ağlarından sabitlenmiştir. Jantın en üst noktasından temas çok yakın pozisyonda rijit bir plaka tanımlanmıştır. Bu plaka gerçek testte 230 mm yükseklikten serbest düşme ile bırakılmaktadır. Ancak simülasyonda serbest düşme tanımlamak çözüm süresini gereksiz uzatacaktır. Bu nedenle simülasyonda oluşturulan rijit plaka jant modeline çok yakın bir pozisyona konumlandırılır ve ilk hız tanımlanır. İlk hız, plakanın 230 mm yükseklikten düşerek, temas noktasına geldiği andaki potansiyel enerji farkının kinetik enerjiye dönüştürmeyle hesaplanmış ve değeri 2,12 m/s'dir (Şekil 8).



Şekil 8. Darbe testi simülasyon modeli

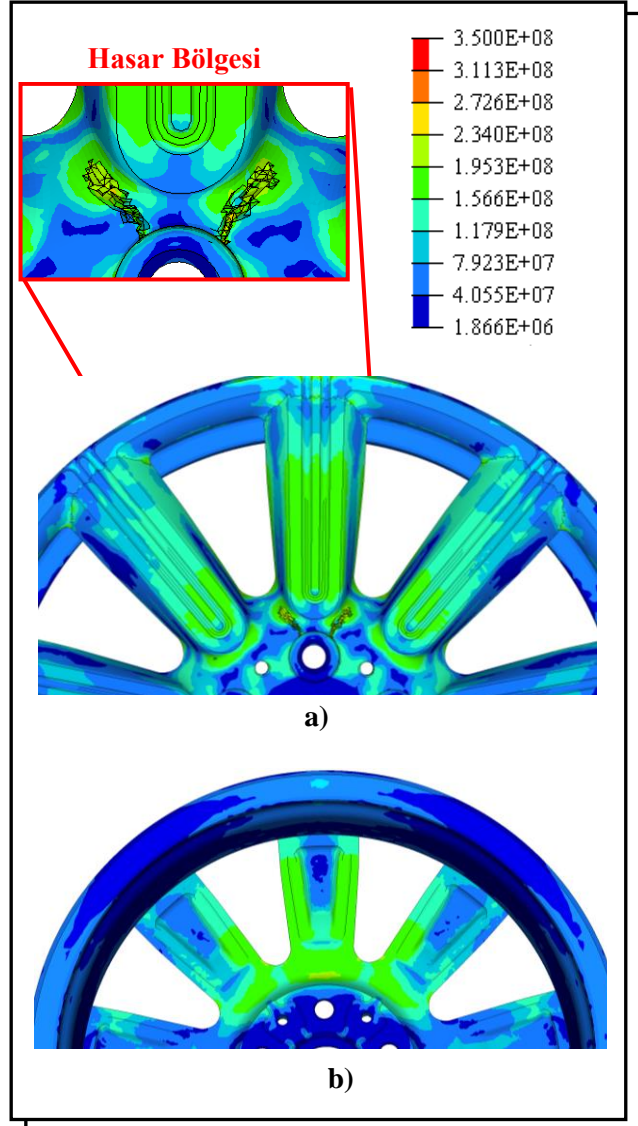
Darbe test simülasyonu bir önceki başlıkta elde edilen Johnson Cook malzeme ve hasar modeli parametrelerinin tanımlanmasıyla analizler Radioss paket programı ile gerçekleştirilir [12]. Denklem 2'de verilen Johnson-Cook hasar modelindeki plastik şekil değişimi  $\epsilon_f > 0$  olması durumunda hasarın oluştuğu ve  $\epsilon_f > 0$  hasar kriterini barındıran elemanlar otomatik olarak modelden silinir. Simülasyon sonucunda jant modelinde oluşan çatlak veya hasarın derinliğine göre simülasyon sonucu yorumlanır. Standart bir darbe testi simülasyonunda şekil değişim hızı etkisi göz önünde bulundurulmamaktadır.

### Sonuçlar ve değerlendirme

Bu çalışma kapsamında, malzeme modeline şekil değişim hızını etkileyen parametreler eklenerek daha gerçekçi simülasyonların yapılması hedeflenmiştir. Sınır şartları, deneysel yöntemdekilere benzer olarak tanımlanmış ve testler ile simülasyonlar arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Başlangıçta, şekil değişim hızı etkisi göz ardı edilerek standart bir darbe testi simülasyonu tamamlanmıştır. Şekil 9'da görüldüğü gibi şekil değişim hızı etkisinin göz ardı edildiği

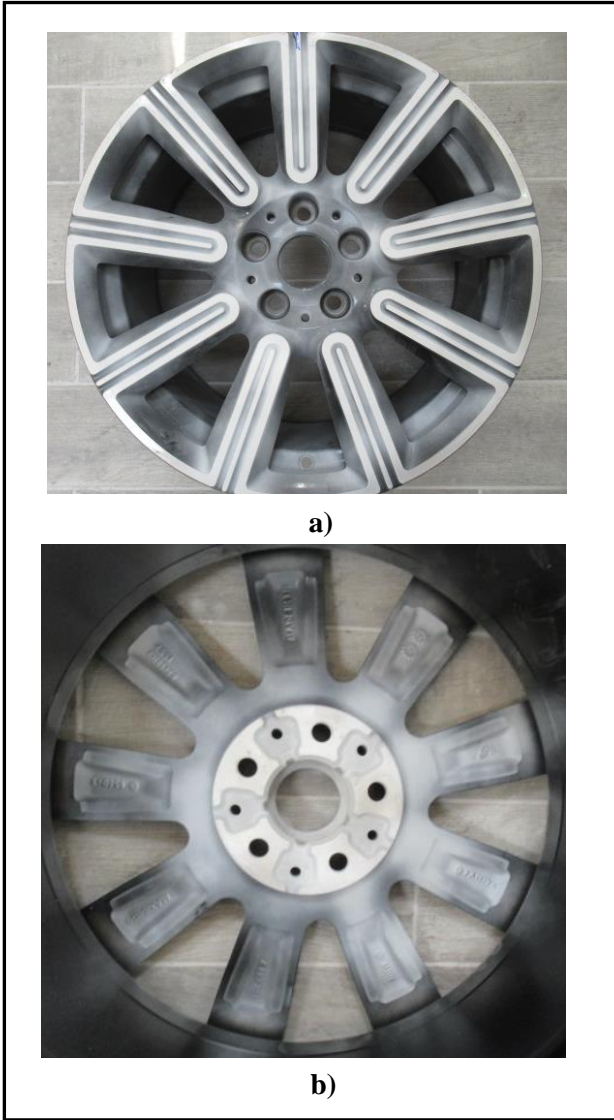
simülasyonlarda, jantın bijon ile feder birleşim noktalarında hasar görülmektedir. Ön yüzeyde derin çatlak oluşmuş ancak komple ayrılma gerçekleşmemiştir. Kırılan bölgeler yüksek gerilme bölgeleridir. Şekil değişim hızının etkisini gösteren parametrenin ihmal edilmesiyle gerçekleştirilen simülasyonda çatlaklar oluşmuştur.



Şekil 9. Şekil değişim hızı etkisi göz ardı edilmiş darbe testi simülasyonu, a) Ön görünüş, b) Arka görünüş

Simülasyon sonuçlarını karşılaştırmak için aynı şartlar altında gerçek darbe testi tamamlanmıştır. Bu testler sonucunda jantlara penetrant muayenesi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir. Görüldüğü üzere, yapılan gerçek testler sonucunda jantta

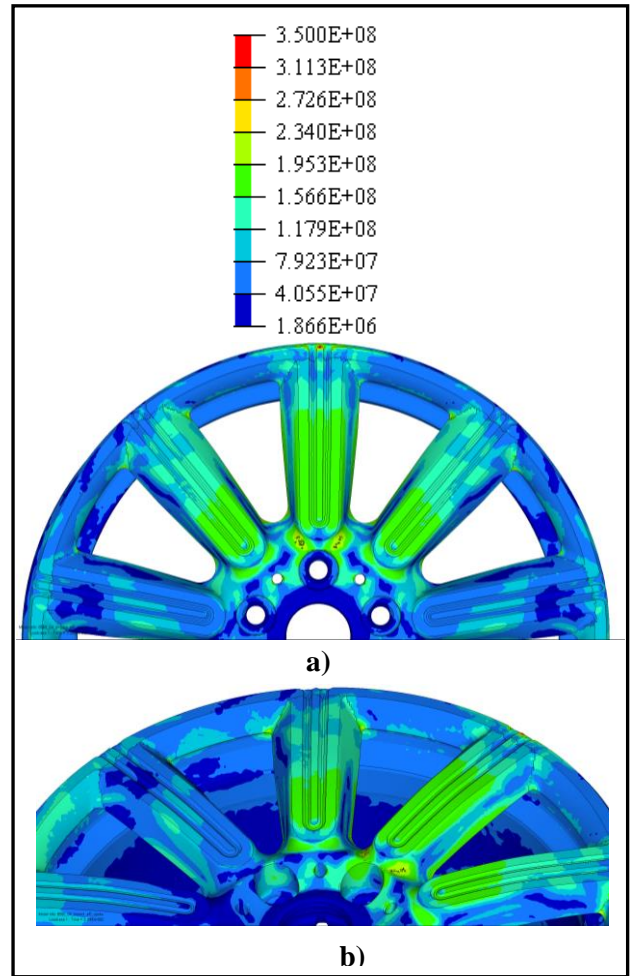
her hangi bir hasar veya çatlak gözlenmemiştir. Bu da yapılan simülasyon ile test arasında bir farklılık olduğu yorumunu ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle simülasyonun geliştirilmesi gerektiği düşünülmüş ve sonuca büyük etkisi olduğu düşünülen malzeme modeline şekil değişim hızı faktörü eklenerek aynı şartlar altında simülasyon tamamlanmıştır.



Şekil 10. Gerçek darbe test sonuçları

Şekil değişim hızı etkisinin dahil edildiği darbe testinin simülasyon sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. Bu simülasyon sonucunda hasar görünmemektedir. Sadece bir kaç elemanın, kopma gerilmesi değerinin üzerine çıkması sonucu ihmal edilebilecek düzeyde hasarlar gerçekleşmiştir. Nitekim bu hasarlar tekil gerilmelerden oluşmuştur. Bir başka deyişle, bu

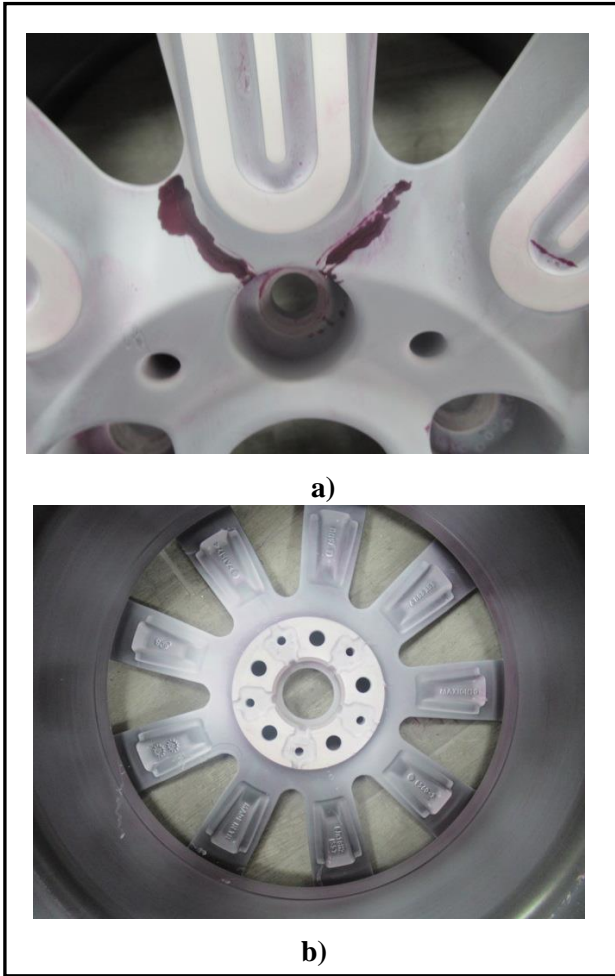
bölgede yer alan piramit elemanlar diğerlerine nazaran daha keskin köşeler barındırdığından daha yüksek gerilmeler oluşmuştur. Bunun sonucu olarak ta bu elemanlarda kısmi de olsa hasarlar tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu simülasyon sonuçları, gerçek testte de herhangi bir hasar oluşmayacağını ön görmektedir. Nitekim Şekil 11'de, şekil değişim hız etkisinin tanımlandığı analizler, tanımlanmayana göre, daha gerçekçi sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 11. Şekil değişim hızı etkisi dahil edilmiş darbe testi simülasyonu, a) Ön görünüş, b) Arka görünüş

Şekil değişim hızı etkisinin göz ardı edildiği, darbe testi simülasyonunda görülen, yüksek gerilme bölgesinin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla tekrar bir gerçek darbe testi yapılmıştır. Bu yapılan darbe testinde, jantta bir çatlak hasarı oluşturmak ve bu bölgeyi doğrulamak için normal taşıması gerektiği ağırlıktan 80 kg daha yüksek bir ağırlık ile test gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 12'de

gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, jantın bijon ve feder birleşim bölgesinde hasar oluşmuştur. Ancak, jantın arkasında bir çatlak hasarı tespit edilmemiştir. Bu test sonuçlarında tespit edilen çatlak, Şekil 9'da görünen hasar ile aynı bölgede oluşmaktadır. Bu da jantın yüksek gerilme bölgesinin doğru tespit edildiği çıkarımının yapılmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 12. Yüksek yük ile yapılan gerçek darbe testi, a) Ön görünüş, b) Arka görünüş

Bu çalışmada darbe testi simülasyonu iki farklı malzeme ve hasar modeli ile yapılmıştır. Bu iki malzeme ve hasar modeli arasındaki tek fark, şekil değişim hız etkisini tanımlayan parametrelerdir. Şekil değişim hızı etkisinin tanımlandığı simülasyon sonuçlarının gerçek test sonuçlarıyla daha uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bir başka deyişle, şekil değiştirme hızı parametresinin dâhil edildiği sonlu elemanlar

tekniklerinden daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Bu sayede tasarım aşamasında daha doğru sonuçlar elde edilip, belki de daha hafif jantların tasarlanması mümkün olacaktır. Otomotiv endüstrisinde, daha doğru simülasyonlar ile birlikte daha hafif jantların tasarlanabilmesi, dolaylı yoldan yakıt tüketimini azaltmaya da fayda sağlayabilecektir. Sonuç olarak, hafif ticari araçlar için jant üretiminde kritik bir test olan sayısal darbe testinde şekil değiştirme hız parametresinin eklenmesiyle, ilerleyen çalışmalarda tekrarlı deneysel testler uygulamadan direkt nümerik yöntem ile jantın mekanik davranışları tespit edilebilecektir.

### Kaynaklar

- [1] Society of Automotive Engineers J175. (2001). Wheels-Impact Test Procedures-Road Vehicles. SAE International Inc, Warrendale, PA, USA.
- [2] Society of Automotive Engineers, (2016). J175-201603, Wheels - Lateral Impact Test Procedure - Road Vehicles, SAE International Inc, Warrendale, PA, USA.
- [3] Ayran, E., (2019). Alüminyum Alaşımli Otomobil Jantlarında Deneysel Darbe Testlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- [4] Şirin, U., (2017). Alüminyum Alaşımli Otomobil Jantının Dinamik Testinin Modellenmesi ve Doğrulama Yaklaşımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- [5] Yang, L., Yang, H., Tan, H., Hu, P., Cheng, X., Lu J., (2018). Impact test simulation and structural optimization of aluminum alloy A356.2 wheel hub, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1074, 012068.
- [6] Yuan X., Zhang L., Chen X., Du B., Li B., Fan L., Pan Y., (2012). Numerical simulation of aluminum alloy wheel 13° impact test based on Abaqus, *Applied Mechanics and Materials* Vols, Trans Tech Publications, Switzerland, 1191-1196.
- [7] Bandral S., Singh., (2018). Impact analysis of car alloy wheel rim using finite element analysis, *International Journal of Engineering Engineering Research & Technology*, RDMEI Conf. Proc., 1-4.
- [8] Chang, C.L., Yang, S.H., (2009). Simulation of wheel impact test using finite element method, *Engineering Failure Analysis*, **16**, 1711-1719.
- [9] Chen, Y., Clausen, A.H., Hopperstad, O.S., Langseth, M., (2009). Stress-strain behaviour of aluminium alloys at a wide range of strain rates, *International Journal of Solids and Structures*, **46**, 3825-35.
- [10] Altenhof, W., Ames, W., (2002). Strain rate effects for aluminum and magnesium alloys in finite element simulations of steering wheel armature impact tests, *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, **25**, 1149-1156.
- [11] 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(1)**, 31-48.
- [12] Radioss Theory Manual, (2017), Large displacement finite element analysis, Altair Engineering.

## Bitlis İlinin Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin İstatistiksel Analizi

### *Statistical Analysis of The Wind Energy Potential of Bitlis Province*

**Faruk ORAL\***

Bitlis Eren Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bitlis  
[foral@beu.edu.tr](mailto:foral@beu.edu.tr) ORCID: 0000-0002-4114-0785

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*

Geliş: 6 Aralık 2019  
Düzeltilme: 18 Mart 2020  
Kabul: 1 Nisan 2020

*Anahtar kelimeler:*

Rüzgâr enerjisi, rüzgâr güç yoğunluğu,  
Weibull dağılımı, Bitlis

#### ÖZET

Bu çalışmada, Bitlis ilinin rüzgâr enerji potansiyeli, Bitlis meteoroloji istasyonunda onar dakikalık olarak ölçülen rüzgâr verileri kullanılarak araştırılmıştır. Rüzgâr verilerinin istatistiksel analizinde, Weibull dağılımı kullanılmıştır. Analiz sonucunda, rüzgâr hızı ve güç yoğunluğunun ortalama değeri hem gözlemlenen hem de Weibull dağılımına göre belirlenmiştir. Weibull dağılımına göre yıllık ortalama rüzgâr hızı ve güç yoğunluğu değerleri sırasıyla 3.26 m/s ve 49.77 W/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Rüzgâr hızının yönlere göre değişimi belirlenmiş ve hakim rüzgâr yönünün %27.5 frekans değerinde Güney-Güneybatı istikametinde olduğu tespit edilmiştir. Rüzgâr verilerinin gözlemlenen ile Weibull dağılımı sonuçlarının birbirine yakın olduğu bulunmuştur. Ayrıca rüzgâr hızı ve güç yoğunluğunun yüksekliğe göre değişimi belirlenmiştir.

*Doi: 10.24012/dumf.655780*

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 6 December 2019  
Revised: 18 March 2020  
Accepted: 1 April 2020

*Keywords:*

Wind energy, wind power density,  
Weibull distribution, Bitlis

#### ABSTRACT

In this study, the wind energy potential of the Bitlis province is investigated using the wind data measured in every ten minutes on the Bitlis meteorological station. In statistical analysis of wind data, Weibull distribution is used. As a result of the analysis, the average value of wind speed and power density were determined according to both observed and Weibull distributions. According to the Weibull distribution, annual average wind speed and power density values were found as being 3.26 m/s and 49.77 W/m<sup>2</sup>, respectively. The variation of the wind speed according to the directions was obtained and it was defined that the dominant wind direction was in the South-Southwest direction with a frequency of 27.5%. It was found that observed wind data and Weibull distribution results were close to each other. In addition, the change of wind speed and power density according to height was also determined.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar



## Giriş

Tüm dünyada enerji üretim ve tüketiminde atıklar sonucu oluşan çevresel olumsuzluklar, artan enerji talebi, yenilenebilir enerji kaynaklarını, enerji üretimi bakımından önemli hale getirmiştir. Yenilenebilir temiz enerji kaynaklarından biri olan rüzgâr enerjisi, kinetik haldeki hava akımıdır. Rüzgâr, güneşin dünya yüzeyini ve atmosferi eşit düzeyde ısıtmaması sonucu oluşan sıcaklık farklılıkları neticesinde meydana gelir. Rüzgârın sahip olduğu bu kinetik enerji, rüzgâr türbinleri yardımı ile mekanik enerjiye ve sonrasında elektrik enerjisine dönüştürülebilir.

Enerji üretimi amaçlı rüzgâr potansiyelinin belirlenmesinde, rüzgâr hızı ve yönü verileri kullanılır. Rüzgâr verilerinin analizinde Weibull ve Rayleigh dağılımları en fazla kullanılan yöntemlerdir. Weibull dağılımı iki parametreye, Rayleigh dağılımı ise tek parametreye sahiptir. Weibull dağılımı iki parametrelidir olduğu için Rayleigh dağılımına göre daha esnektir.

Türkiye’de çeşitli yerlerin rüzgâr enerjisi potansiyeli araştırılmıştır. Karslı ve Geçit [1], yaptıkları çalışmada, Gaziantep-Nurdağı bölgesinin rüzgâr gücü potansiyelini incelemişlerdir. Weibull dağılımına göre yapılan analizde, bölgenin ortalama rüzgâr hızı ve güç yoğunluğu değerlerini belirlemişlerdir. Özerdem ve Türkeli [2], çalışmalarında, seçilen bir üniversite yerleşke alanında rüzgâr karakteristiğini incelemişlerdir. Analizde; aylık ve yıllık ortalama rüzgâr hızını, rüzgâr yönü, rüzgâr türbülans değerini, Weibull parametrelerini hesaplamışlardır. Köse vd. [3], Kütahya bölgesi rüzgâr enerji potansiyeli ve rüzgâr verilerinin analizini incelemişlerdir. Bu amaçla bölgede 20 aylık rüzgâr verilerini kullanarak 30 m yükseklik için ortalama rüzgâr hızı ve değerini bulmuşlardır. Akpınar ve Akpınar [4], Elazığ, Maden bölgesinin yıllık ortalama rüzgâr hızını 5.63 m/s, yıllık ortalama güç yoğunluğunu 244.65 W/m<sup>2</sup> olarak bulmuşlardır. Bilgili vd. [5], yaptıkları çalışmada, Antakya ve İskenderun bölgesinin rüzgâr enerji potansiyelini incelemişlerdir. Bu amaç ile 1997 ile 2001 yılları arasında ölçülen rüzgâr verilerini kullanmışlardır. Şahin vd. [6], Doğu Akdeniz bölgesi için; 1992-2001 yılları

arasında rüzgâr verileri kullanarak, 25 m yükseklik için ortalama rüzgâr güç yoğunluğu değerini 500 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplamışlardır. Gökçek vd. [7], Kırklareli bölgesi rüzgâr karakteristiği ve potansiyelini incelemişlerdir. 2004 yılı ölçülen rüzgâr verilerini kullanarak, ortalama rüzgâr hızını ve güç yoğunluğu değerini belirlemişlerdir. Korukçu [8], çalışmada Belen ve Gökçeada bölgelerinde 50 m yüksekliğinde yıllık ortalama rüzgâr hızları 10.2 m/s, güç yoğunluğu değerleri ise sırasıyla 1581 W/m<sup>2</sup> ve 1297 W/m<sup>2</sup> olarak bulmuştur. Oral vd. [9], Sakarya – Esentepe bölgesi rüzgâr enerji potansiyelini araştırmışlardır. 30 m yükseklikte ölçülen rüzgâr verilerini kullanarak, yıllık ortalama rüzgâr hızı ve güç yoğunluğu değerini bulmuşlardır. Bilgili vd. [10], Türkiye’nin güneyinde bulunan dokuz yerleşim yerinin rüzgâr enerji potansiyelini incelemişlerdir. Analiz sonucunda incelenen bölgelerin rüzgâr enerji potansiyellerinin yüksek olduğunu, rüzgâr türbini kurulmasına elverişli bölgeler olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı; bugüne kadar rüzgâr enerjisi bakımından henüz daha araştırılmayan Bitlis ilinin rüzgâr enerji potansiyelini belirlemektir. Rüzgâr potansiyelinin belirlenmesinde, Bitlis meteoroloji istasyonunda ölçülen rüzgâr verileri kullanılmıştır. Rüzgâr verilerinin analizinde Weibull dağılımı kullanılmıştır. Weibull dağılımı kullanılarak yapılan analiz sonuçları, gözlemlenen verilerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda, ortalama rüzgâr hızı, rüzgâr hızının saatlik ve aylık değişimi, rüzgârın hâkim esme yönü, ortalama rüzgâr gücü yoğunluğu, yüksekliğe göre ortalama rüzgâr hızı ve güç yoğunluğunun değişimi belirlenmiştir. Çalışmada, Matlab ve WindPRO programları kullanılmıştır.

## Materyal ve Matematiksel Metot

Bir bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde rüzgâr verileri kullanılır. Bu çalışmada Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün Bitlis meteoroloji istasyonundan elde edilen rüzgâr verileri kullanılmıştır. Söz konusu istasyonun rüzgâr potansiyelinin araştırılacağı alanın uygun yerinde bulunması, rüzgâr verilerinin buradan alınmasında etkili olmuştur.

Ölçüm istasyonu, 252529 E, 4262353 N (UTM koordinat sistemine göre) koordinatlarında olup deniz seviyesinden 1794 m yüksekliğindedir. Çalışmada, Bitlis meteoroloji istasyonunda 10 metre yükseklikte ölçülen 2011 ve 2012 yıllarını kapsayan rüzgâr verileri kullanılmıştır. Rüzgâr verileri, onar dakikalık ortalamalar halinde hız ve yön değerlerinden oluşmaktadır. Belirli bir zaman aralığında ölçülen rüzgâr değerlerinde farklı tarih ve zamanlarda eşit rüzgâr hızları gözlemlenebilmektedir. Bir rüzgâr serisinde, bir rüzgâr hızının ( $v_i$ ) gözlemlenen toplam sayısı  $m_i$  ise, bu rüzgâr hızının esme ihtimali  $p(v_i)$ ;

$$p(v_i) = \frac{m_i}{n} \quad (1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada  $n$ , rüzgâr serisindeki ölçüm değerleri sayısını veya toplam gözlem sayısını ifade etmektedir. Rüzgâr verilerinin değerlendirilmesinde en önemli özelliklerden birisi ortalama rüzgâr hızıdır. Ortalama rüzgâr hızı; ölçülen veya gözlemlenen rüzgâr hızı değerlerinin ortalamasıdır. Bir rüzgâr veri setinin değişkenliği de önemlidir. Bir seriyi meydana getiren rüzgâr hızı değerlerinin ortalama rüzgâr hızı değerinden farklarının kareleri ortalamasının karekökü değeri, standart fark olarak ifade edilir. Bir rüzgâr serisinin ortalama hızı ( $v_m$ ) ve standart farkı ( $\sigma$ ) aşağıda verilen eşitlikler ile hesaplanır.

$$v_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^w m_i v_i \quad (2)$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - v_m)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Burada  $w$ , gözlemlenen farklı rüzgâr hızı sayısını ifade etmektedir.  $v$  hızında,  $A$  dikey kesit alanından akan bir rüzgarın sahip olduğu güç ( $P_v$ ) ile belirli tarih aralığında gözlemlenen rüzgâr serisinin ortalama güç yoğunluğu ( $P_m$ ), aşağıda verilen eşitlikler ile ifade edilir.

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4)$$

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A \sum_{i=1}^w p(v_i) v_i^3 \quad (5)$$

Weibull dağılımı birçok çalışmada [2-11], rüzgâr verilerinin analizinde ve rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Rüzgâr enerjisi ile ilgili yapılan birçok çalışmada, rüzgâr hızı verilerinin iki parametrelili Weibull dağılımı özelliği gösterdiği belirlenmiştir [3-14]. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu, şekil ( $k$ ) ve ölçek ( $c$ ) parametrelerinden oluşur. Bu fonksiyon, herhangi bir rüzgâr hızında, esme sayısını ifade eder. Bu dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verilen eşitlik ile ifade edilir [16].

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ -\left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (6)$$

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu rüzgâr verilerinin tamamını temsil etmektedir. Belirli bir rüzgâr hızı değerinden küçük yada eşit gerçekleşme olasılığını vermekte olan Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir [15].

$$F(v) = 1 - \exp \left[ -\left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (7)$$

Literatürde Weibull yoğunluk fonksiyonu parametrelerinin belirlenmesinde, çeşitli metotlar geliştirilmiştir (Grafik yöntemi, En yüksek olasılık yöntemi, Moment yöntemi, Güç yoğunluğu yöntemi, Ortalama rüzgâr hızı-standart sapma yöntemi ve benzeri gibi). Grafik, moment ve en yüksek olasılık metotları bu yöntemlerin başında gelmektedir. Bu çalışmada Weibull yoğunluk fonksiyonunun parametrelerinin belirlenmesinde, en yüksek olasılık metodu (EYO) kullanılmıştır. Bu metotta; gözlemlenen her bir rüzgâr hızı değerleri, birbirlerinden bağımsız olduklarından, yapılan  $n$  adet gözlemlerde bu olayların meydana gelme olasılığı;

$$LL(v_1, v_2, \dots, v_n, k, c) = \prod_{i=1}^n f(v_i; k, c) \quad (8)$$

biçiminde olasılık fonksiyonu ile ifade edilebilir [15-17]. Bu fonksiyonu en yüksek yapan ( $k$ ) ve ( $c$ ) değerleri, en yüksek olasılık tahminleridir. Bu yöntemde, çözümü kolaylaştırmak için Eşitlik (8)'in her iki tarafının logaritması alınmak suretiyle olasılık fonksiyonu toplam haline getirilir. Eşitlik (6),

Eşitlik (8)'de yerine konulup elde edilen yeni eşitliğin logaritması alınması durumunda;

$$\ln LL = n(\ln k - k \ln c) + (k-1) \sum_{i=1}^n \ln(v_i) - \frac{1}{c^k} \sum_{i=1}^n (v_i)^k \quad (9)$$

eşitliği elde edilir. Bulunan son eşitliği, (c) ve (k) parametrelerine göre ayrı ayrı birinci dereceden kısmi türevi alınıp sıfıra eşitlenirse, aşağıdaki eşitlikler bulunur.

$$c = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{1/k} \quad (10)$$

$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln v_i}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln v_i}{n} \right)^{-1} \quad (11)$$

Bu son eşitliklerinin iteratif olarak çözülmesi ile (k) ve (c) parametrelerin EYO tahminleri elde edilir. Weibull dağılımına göre, ölçülen rüzgâr hızı verilerinin ortalama ve standart sapma değerleri aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilir [12].

$$v_m = c \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \quad (12)$$

$$\sigma = c \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) - \Gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{1/2} \quad (13)$$

Burada,  $\Gamma(\cdot)$  gama fonksiyonu olarak ifade edilmektedir.

Weibull dağılımı için  $v$  esme hızına sahip rüzgârın meydana getirebileceği ortalama rüzgâr gücü yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle hesaplanır [12].

$$P_m = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho v^3 f(v) dv = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left( 1 + \frac{3}{k} \right) \quad (14)$$

Rüzgâr hızı üzerinde, arazinin topoğrafik yapısının engelleyici etkisi olacaktır. Rüzgâr hızı, yükseklik arttıkça arazi pürüzlülüğüne bağlı olarak logaritmik şekilde artmaktadır. Rüzgâr türbinlerinden üretilebilecek enerji miktarının hesaplanmasında, türbin hub yüksekliğinde rüzgâr hızı değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Belirli bir yükseklikte ölçülmüş rüzgâr hızları kullanılarak istenilen herhangi bir yükseklikteki rüzgâr hızları, aşağıda verilen kuvvet kanunu eşitliği ile hesaplanabilir [18].

$$\frac{v}{v_z} = \left( \frac{h}{h_z} \right)^{\alpha} \quad (15)$$

Burada  $v$ ;  $h$  ölçüm yüksekliğinde gözlemlenen rüzgâr hızını,  $v_z$ ;  $h_z$  yüksekliğinde hesaplanacak rüzgâr hızı değerini ifade etmektedir. Eşitlikte kullanılan üstel terim  $\alpha$ ; rüzgâr ölçümünün yapıldığı yerdeki yüzey pürüzlülüğüne ve atmosferik kararlılık gibi özelliklere bağlı olarak 0.05-0.5 arasında değişir. Bu çalışmada  $\alpha$  üssü değeri 0.15 olarak alınmıştır.

### Analiz Sonuçları

2011 ve 2012 yıllarını kapsayan iki yıllık rüzgâr verileri kullanılarak Eşitlik (2), Eşitlik (3) ve Eşitlik (5) yardımı ile gözlemlenen (gerçek) verilerin ortalama rüzgâr hızı ( $v_m$ ), standart sapma ve ortalama güç yoğunluğu değerleri bulunmuştur. Rüzgâr verilerinin analizinde, Weibull dağılımı kullanılmıştır. Weibull dağılımı parametrelerinin belirlenmesinde EYO metodu, bu metodundan elde edilen eşitliklerin sayısal çözümünde Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır.

İki yıllık rüzgâr verilerinin gözlemlenen ve Weibull dağılımı sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1, incelendiğinde, rüzgâr hızı ve güç yoğunluğunun gözlemlenen ortalama değerleri sırasıyla 3.13 m/s, 50.01 W/m<sup>2</sup> bulunmuştur. Gözlemlenen rüzgâr hızı değerlerinin standart sapması 2.2449 olarak hesaplanmıştır. Weibull dağılımının  $k$  ve  $c$  parametreleri sırasıyla 1.49 ve 3.61 m/s olarak bulunmuştur. Rüzgâr verilerinin Weibull dağılımına göre, rüzgâr hız ve güç yoğunluğunun ortalama değeri sırası ile, 3.26 m/s ve 49.77 W/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Bu dağılıma göre rüzgâr hızlarının standart sapma değeri 2.17899 olarak hesaplanmıştır. Tablo 1'de görüldüğü gibi, yapılan analiz neticesinde Weibull dağılımı sonuçlarının gözlemlenen değerlere yakın olduğu belirlenmiştir.

*Tablo 1. Yıllık ortalama rüzgâr hızı, standart sapma ve güç yoğunluğu değerleri*

*Table 1. Annual average wind speed, standard deviation and average power density values*

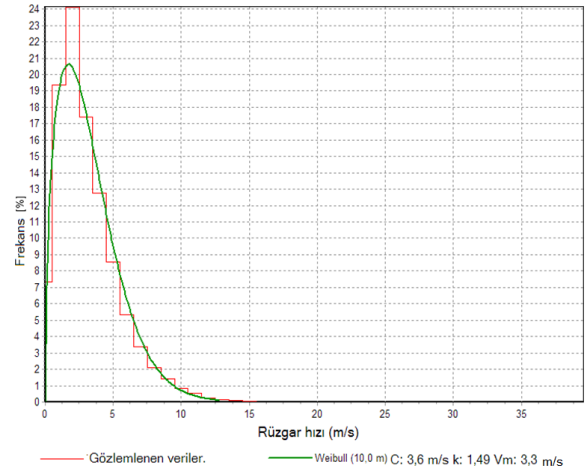
	$v_m$ (m/s)	k	c (m/s)	$\sigma$	$P_m$ (W/m <sup>2</sup> )
Gözlemlenen değer	3.13	-	-	2.2449	50.01
Weibull dağılımı	3.26	1.490	3.61	2.1789	49.77

İki yıllık rüzgâr verilerinin Weibull dağılımına göre sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 1’de rüzgâr hızının frekans dağılımı, Şekil 2 ve Şekil 3’de rüzgâr hızı ve frekansının sektörel değişimi verilmiştir.

*Tablo 2. Weibull dağılımına göre sektörel frekans değerleri*

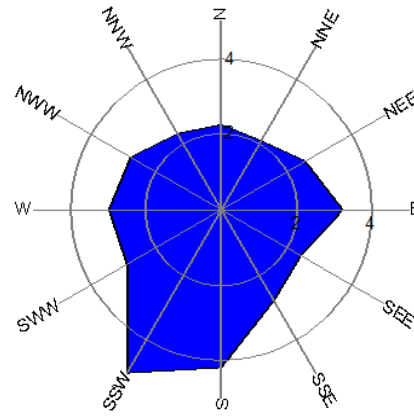
*Table 2. According to the Weibull distribution, sectoral average wind speed, Weibull parameters and frequency distribution*

Sektör	$v_m$ (m/s)	c (m/s)	k	Frekans (%)
0-N	2.24	2.53	1.844	9.3
1-NNE	2.11	2.36	1.677	13.9
2-NEE	2.55	2.87	1.861	14.0
3-E	3.22	3.60	1.673	3.2
4-ESE	2.42	2.41	0.991	0.7
5-SSE	2.78	2.91	1.140	0.8
6-S	4.16	4.68	1.847	4.9
7-SSW	5.00	5.63	1.970	27.5
8-WSW	2.87	3.22	1.695	4.4
9-W	2.98	3.33	1.635	2.9
10-WNW	2.80	3.16	2.116	7.4
11-NNW	2.34	2.65	2.071	11.0
Ortalama	3.26	3.61	1.490	100



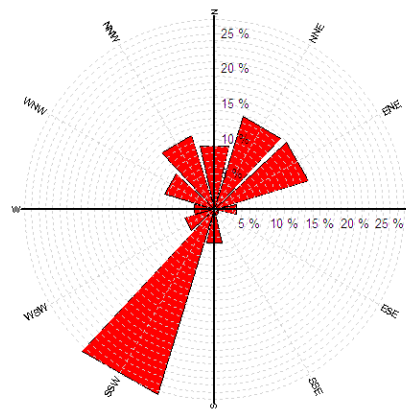
*Şekil 1. Rüzgâr hızı frekans dağılımı*

*Figure 1. Frequency distribution of wind speed*



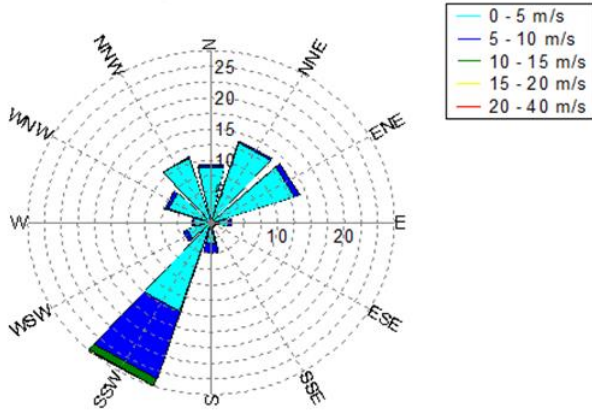
*Şekil 2. Rüzgâr hızının sektörel değişimi (m/s)*

*Figure 2. Sectoral changing of wind speed*



*Şekil 3. Rüzgâr yönünün sektörel frekans değişimi (%)*

*Figure 3. Sectoral frequency changing of Wind direction*

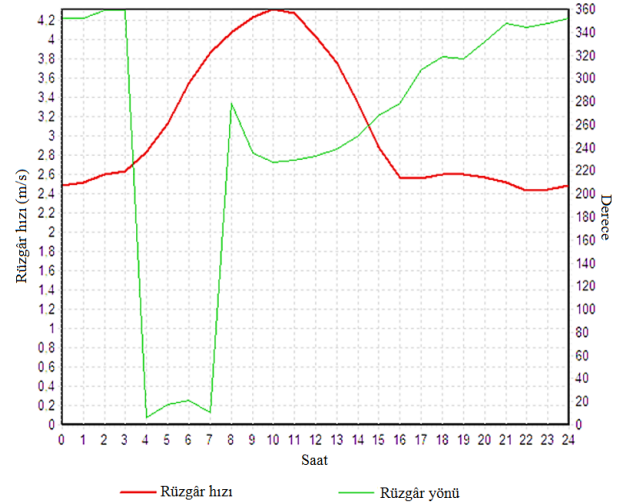


Şekil 4. Rüzgâr hızı değerlerinin sektörel frekans değişim (%)

Figure 4. Sectoral frequency changing of wind speed

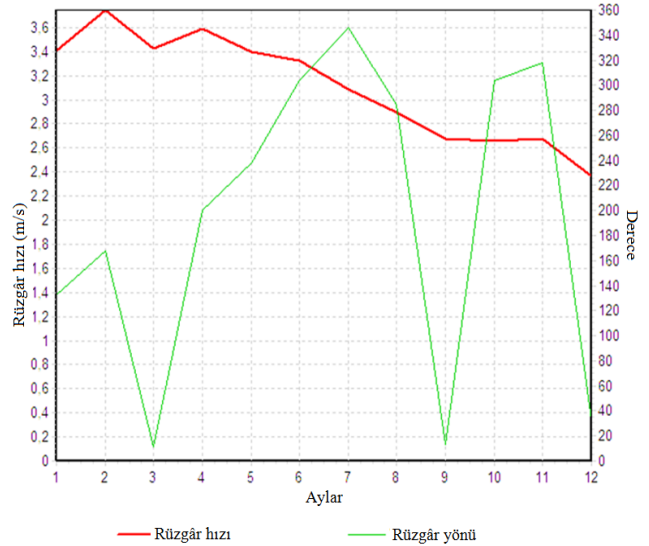
Tablo 2, Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3’de verilen bilgilerden, ortalama rüzgâr hızı ( $v_m$ ) 3.26 m/s, Weibull ( $k$ ) şekil parametresi 1.49, ( $c$ ) ölçek parametresi 3.61 m/s bulunmuştur. Rüzgâr hızının en büyük frekansı %27.5 değerinde Güney-Güneybatı yönünde gerçekleştiği, bu yönde ortalama rüzgâr hızı 5.0 m/s, Weibull şekil parametresi 1.97 ve ölçek parametresi 5.63 m/s olarak bulunmuştur. Ortalama en büyük rüzgâr hızı Güney-Güneybatı istikametinde ve 5 m/s değerinde gerçekleşmiştir. Weibull şekil parametresinin en büyük değerinin 2.116 değerinde Batı-Kuzeybatı, ölçek parametresinin en büyük değerinin ise 5.63 m/s olarak Güney-Güneybatı istikametinde olduğu görülmüştür. Bölgede hâkim rüzgâr yönünün %27.5 frekans ile Güney-Güneybatı yönünde gerçekleştiği bulunmuştur. Kuzey-Kuzeydoğu ve Doğu-Kuzeydoğu istikametlerinde rüzgâr frekansı değerlerinin büyük olduğu görülmüştür. Şekil 4’de rüzgâr hızı değerlerinin sektörel frekans değişimi verilmiştir. 5-10 m/s arasındaki rüzgâr hızlarının en büyük frekans değerinin hâkim rüzgâr yönü olan Güney-Güneybatı istikametinde olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5’de, Weibull dağılımına göre, rüzgâr hızı ve yönünün saatlik ortalama değişimi verilmiştir. Şekil 5’de görüldüğü gibi, ortalama rüzgâr hız değerleri, saat 03:00 ile 10:00 arasında artma eğiliminde olduğu, sonraki saatlerde azalarak saat 15:00’da normaleştiği görülmüştür.



Şekil 5. Rüzgâr hızı ve yönünün saatlik değişimi

Figure 5. Hourly changing of average wind speed and directions



Şekil 6. Aylık ortalama rüzgâr hızı ve yönünün değişimi.

Figure 6. Changing of monthly average wind speed and directions

Şekil 6’da, Weibull dağılımına göre rüzgâr hızı ve yönünün aylık ortalama değerleri verilmiştir. Rüzgâr hızının en büyük ortalama değeri 3.8 m/s ile Şubat ayında gerçekleşmiştir. En düşük ortalama rüzgâr hızı değeri 2.4 m/s ile Aralık ayında olmuştur. Rüzgâr hızının ilk altı ayının ortalama değerleri diğer aylara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Referans ölçüm yüksekliği olan 10 metredeki rüzgâr hızı verileri kullanılarak, farklı yükseklikteki ortalama rüzgâr hızı, güç

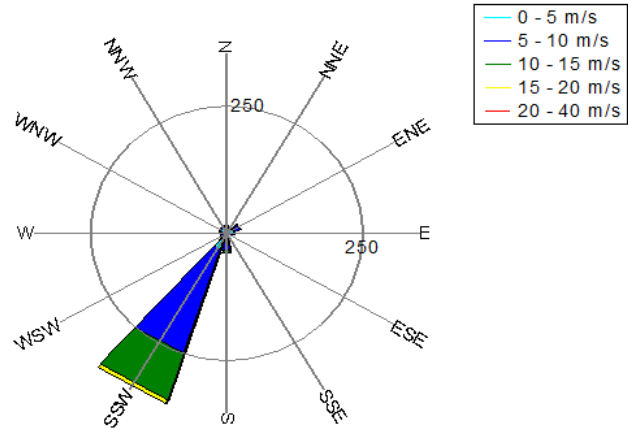
yoğunluğu ve Weibull parametre değerleri, Eşitlik (14) ve Eşitlik (15) yardımı ile hesaplanarak Tablo 3’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde; yüksekliğin artması ile birlikte yıllık ortalama rüzgâr hızı, Weibull parametreleri, yıllık ortalama güç ve enerji yoğunluğu değerlerini arttığı belirlenmiştir. 200 m yükseklik için Weibull dağılımına göre, rüzgâr hızı ortalaması 5.16 m/s, c ve k parametrelerinin değerleri sırasıyla, 5.8 (m/s), 2.12 olarak bulunmuştur. Yine bu yükseklik için ortalama güç ve enerji yoğunlukları sırasıyla, 127.97 W/m<sup>2</sup> ve 1121 kWh/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. Yüksekliğe göre ortalama rüzgâr hızı, Weibull parametreleri ve güç yoğunluğu değişimi.

Table 3. According to height, average wind speed, Weibull parameters and power density change

Height (m)	$v_m$ (m/s)	c (m/s)	k	$P_m$ (W/m <sup>2</sup> )	Rüzgâr enerjisi (kWh/m <sup>2</sup> )
10	3.26	3.6	1.49	49.77	436
20	3.61	4.0	1.53	64.84	568
30	3.83	4.3	1.58	74.54	653
40	4.00	4.5	1.62	81.74	716
50	4.13	4.6	1.66	87.44	766
60	4.25	4.8	1.70	92.24	808
70	4.35	4.9	1.73	96.23	843
80	4.44	5.0	1.77	99.77	874
90	4.52	5.1	1.80	102.97	902
100	4.60	5.2	1.84	105.82	927
110	4.67	5.3	1.87	108.56	951
120	4.74	5.3	1.90	111.07	973
130	4.80	5.4	1.93	113.47	994
140	4.86	5.5	1.96	115.75	1014
150	4.91	5.5	1.99	117.92	1033
160	4.97	5.6	2.02	120.09	1052
170	5.02	5.7	2.04	122.15	1070
180	5.07	5.7	2.07	124.09	1087
190	5.12	5.8	2.09	126.03	1104
200	5.16	5.8	2.12	127.97	1121

Şekil 7’da sektörel olarak yıllık ortalama enerji yoğunluğu verilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği gibi ortalama enerji yoğunluğunun en büyük değeri, güney-güneybatı yönünden esen rüzgâr hızlarından olmuştur. Enerji üretimi bakımından hâkim yön, güney-güneybatı istikametindedir. Bu yönde esen rüzgâr hızı ortalamasının ağırlıklı değerleri, 5-10 m/s ve 10-15 m/s aralığında gerçekleşmiştir.



Şekil 7. Sektörel ortalama enerji yoğunluğu (kWh/m<sup>2</sup>)

Figure 7. Sectoral average energy density

## Sonuçlar

Bu çalışmada; Bitlis ilinin rüzgâr enerjisi potansiyeli incelenmiştir. Araştırmada Bitlis meteoroloji istasyonundan alınan rüzgâr verileri kullanılmıştır. Rüzgâr verilerinin istatistiksel analizinde Weibull dağılımı kullanılmıştır. Weibull dağılımı sonuçları gözlemlenen değerlere göre karşılaştırılmıştır.

Rüzgâr verilerinin gözlemlenen değerlerinin analizi sonucunda; rüzgâr hızı ve güç yoğunluğunun ortalama değerleri sırasıyla, 3.13 m/s ve 50.01 W/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Weibull dağılımına göre, rüzgâr hızı ve güç yoğunluğunun ortalama değerleri sırasıyla, 3.26 m/s ve 49.77 W/m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Rüzgâr verilerinin gözlemlenen ve Weibull sonuçlarının birbirine yakın değerlerde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Bölgede hâkim rüzgâr yönünün %27.5 frekans değerinde Güney-Güneybatı istikametinin olduğu tespit edilmiştir. Hâkim yönde rüzgâr hızının ortalama değerinin 5 m/s olduğu belirlenmiştir. Hâkim yönünde 5-10 m/s

arasındaki rüzgâr hızlarının önemsenerek frekans değerlerinde olduğu görülmüştür.

Weibull dağılımına göre ortalama rüzgâr hızı değerlerinin saatlik ve aylık değişimi incelenmiştir. Ortalama saatlik rüzgâr hızı değerlerinin saat 03:00 ile saat 10:00 arasında artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Aylık ortalama rüzgâr hızının en büyük değeri Şubat ayında, en düşük değeri ise Aralık ayında gerçekleştiği bulunmuştur.

Bölgede rüzgâr hızı, Weibull parametreleri ve güç yoğunluğunun ortalama değerlerin yüksekliğe göre değişimi belirlenmiştir. Yüksekliğin artması ile birlikte ortalama rüzgâr hızının ve güç yoğunluğunun arttığı görülmüştür.

Artan enerji talebi ve yaşanan çevresel olumsuzluklar, rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından iyi olabilecek bölgelerin enerji üretimi bakımından değerlendirilmesini önemli kılmaktadır.

Sonuç olarak, bölgenin ölçüm yüksekliğinde ortalama rüzgâr hızı ve güç yoğunluğu değerlerinin düşük olması sebebiyle enerji üretimi bakımından elverişli olmadığını, yüksekliğe bağlı olarak ortalama rüzgâr hızı ve güç yoğunluğunun artması nedeniyle bölgenin yüksek rakımlı farklı kısımlarında yapılacak rüzgâr ölçümü ve analizi ile enerji üretimi bakımından uygun yerlerin olabileceği, hâkim rüzgâr yönünde 5-10 m/s arasındaki rüzgâr hızı frekans değerlerinin büyük olması enerji üretimine olumlu katkılar verebileceği ve saatlik ortalama rüzgâr hızının 2.4 m/s'nin üzerinde olması durumunda da enerji üretimi amaçlı küçük güçlü rüzgâr türbinlerinin kullanımına elverişli olabileceği kanaati oluşmuştur.

## Kaynaklar

- [1] V.M. Karsli, C. Geçit, An investigation on wind power potential of Nurdağı-Gaziantep Turkey, *Renewable Energy*, 28(5), 823-830, 2003.
- [2] B. Özerdem, M. Turkeli, An investigation of wind characteristics on the campus of Izmir Institute of Technology, Turkey, *Renewable Energy*, 28(7), 1013-1027, 2003.
- [3] R. Kose, M.A. Ozgur, O. Erbas, A. Tugcu, The analysis of wind data and wind energy potential in Kutahya, Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(3), 277-288, 2004.
- [4] E.K. Akpınar, S. Akpınar, Determination of the wind energy potential for Maden-Elazığ, Turkey, *Energy Conversion and Management*, 45(18-19), 2901-2914, 2004.

- [5] M. Bilgili, B. Şahin, A. Kahraman, Wind energy potential in Antakya and İskenderun regions, Turkey, *Renewable Energy*, 29(10), 1733-1745, 2004.
- [6] B. Sahin, M. Bilgili, H. Akilli, The wind power potential of the eastern Mediterranean region of Turkey, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(2), 171-183, 2005.
- [7] M. Gökçek, A. Bayülken, Ş. Bekdemir, Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey, *Renewable Energy*, 32(10), 1739-1752, 2007.
- [8] M.Ö. Korukçu, Türkiye'de dört yerleşim yeri için rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 16(1), 117-125, 2011.
- [9] F. Oral, İ. Ekmekçi, N. Onat, Weibull distribution for determination of wind analysis and energy production, *World Journal of Engineering*, 12(3), 215-220, 2015.
- [10] M. Bilgili, B. Şahin, E. Şimşek, Türkiye'nin güney, güneybatı ve batı bölgelerindeki rüzgâr enerjisi potansiyeli, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 30(1), 01-12, 2010.
- [11] K. Ulgen, A. Hepbasli, Determination of Weibull parameters for wind energy analysis of Izmir, Turkey, *International Journal of Energy Research*, 26(6), 495-506, 2002.
- [12] A.N. Çelik, A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey, *Renewable Energy*, 29(4), 593-604, 2003.
- [13] S. Persaud, D. Flynn, B. Fox, Potential for wind generation on the Guyana coastlands, *Renewable Energy*, 18(2), 175-189, 1999.
- [14] I.Y.F. Lun, J.C. Lam, A study of Weibull parameters using long-term wind observations, *Renewable Energy*, 20(2), 145-153, 2000.
- [15] J.V. Seguro, T.W. Lambert, Modern estimation of the parameters of the Weibull wind Speed distribution for wind energy analysis, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(1), 75-84, 2000.
- [16] M.N. Almalı, İki parametrelili Weibull dağılımında parametrelerin tahminlenmesi için farklı yöntemlerin karşılaştırılması ve rüzgâr hızı verilerine uygulanması, *Doktora Tezi*, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye, 2005.
- [17] M.J.M. Stevens, P.T. Smulders, The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes, *Wind Engineering*, 3(2), 132-145, 1979.
- [18] N. Eskin, H. Artar, S. Tolun, Wind energy potential of Gokceada Island in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(3), 839-851, 2008.



## Humanitarian Logistics Management After A Disaster: An Earthquake Case

Elifcan Göçmen <sup>1,\*</sup>, Yusuf Kuvvetli <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Munzur University, Engineering Faculty, Department of Industrial Engineering, Tunceli , 0000-0002-0316-281X

<sup>2</sup> Çukurova University, Engineering Faculty, Department of Industrial Engineering, Adana, 0000-0002-9817-1371

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 11 December 2019  
Received in revised form  
21 April 2020  
Accepted 23 May 2020  
Available online xxx

#### Keywords:

*Post-disaster relief logistics,  
Inventory-routing problems,  
Mathematical modelling,  
Earthquake*

### ABSTRACT

Post-disaster relief logistics includes logistics activities in the shortest time. Inventory routing problems have decided routing decisions considering inventory levels during the planning horizon at minimum cost. In this study, an inventory routing problem for the distribution after the disaster has been proposed. The problem aims the distribution of the supplies needed considering available inventory levels at minimum time. Distribution amount and the routes under the constraints of routing and inventory amounts for affected people have been decided. An integer programming approach to solve the problem has been proposed and solved. The proposed model is solved for a case of Van earthquake which occurred at 2011 in Turkey. The results from the case study show us that determining the inventory and routing decisions simultaneously can provide less logistic activities. In addition to this, holding inventory in the central depot can ensure to respond the emergency needs safely and quickly.

Doi: 10.24012/dumf.658184

\* Corresponding author  
Elifcan, Göçmen  
✉ [elifcangocmen@munzur.edu.tr](mailto:elifcangocmen@munzur.edu.tr)



## Introduction

Disasters are sudden, dangerous events and cause catastrophe in human life. They have affected nations in recent decades. Thus, to manage effective humanitarian operations is an important part of a disaster relief. Disaster management is the process of taking measures beforehand and inspecting the effects of a disaster. Humanitarian logistics is sub-part of logistics that is relevant of the disaster management. This area is suitable for mathematical approach and several applications.

Organizations pay more attention to increase the efficiency of logistics systems. They are aware that the inventory routing decisions based on their logistics network are critical. The inventory-routing problems (IRPs) have been one of the most important problems. Several applications of the IRP have been documented [1]. Humanitarian logistics is a good area for the applications of the IRP and it has received interest both from academics and the practitioners. It includes disaster relief and support for developing regions [2]. Quick response to the urgent need after disasters is critical for emergency logistics [3]. Managing the emergency logistics is difficult because of this critical structure. Disaster management has gained interest after the 1999 Marmara Earthquake in Turkey. Post disaster relief regulations were organized and distribution of aids to affected people was suitably ensured. This study has been carried out to decide the routes considering the inventory levels at minimum cost after a disaster.

Disaster management requires solving several problems to help the affected people. These problems include location, routing and inventory decisions. Many studies about location-inventory problems are conducted by many researchers. They use exact formulations or/and heuristic algorithms to solve the problem. A model is proposed that decides the location of distribution centres and supplies to be stocked at the centres [4]. The location-inventory problem of rescue services is investigated. In the post disaster, they assign the relief items between demand points and

rescue centres [5]. A disaster planning of medical needs is provided. The model determines the storage location, inventory levels, and distribution decisions. The study is applied for an earthquake scenario [6]. A mixed integer model is developed for location inventory problem. They aim to minimize the response time. The model is established for 9 warehouses and 3 inventory levels [7]. A two stage approach is proposed for an earthquake. They firstly try to solve location inventory problem and then vehicle routing is handled. By the uncertain situations, they use robust approach. They also meta heuristic methods [8].

Disaster management also requires giving decisions about routing problems. Transportation of aids for the affected people is ensured by the effective routes. Many studies about routing/distribution problems are conducted by many researchers. A mathematical model is developed for emergency logistics planning. They integrate two network flow problems, the first one linear and the second one integer. They needed heuristic solutions for the second problem [9]. A problem is presented about bioterrorism emergencies. They decomposed the problem into two stages. In the first stage, they plan the routes in any emergency; in the second stage they decide the delivery quantity. They use mathematical formulations to solve the problems [10]. Many studies about location problems are conducted by many researchers. Humanitarian logistics network is designed under mixed uncertainty involving multiple warehouses, local distribution centres. In the first step, locations of warehouses and centres are determined and then, a distribution decision is given to minimize total distribution time, total cost of unused inventories. The study is applied in Tehran for potential earthquakes [11]. A location-allocation problem is proposed to minimize response time. Ambulance locations near demand points are positioned [12]. A humanitarian supply chain design is developed. They use a p-median model for small instances and a tabu heuristic for large instances. The heuristic method has given better results. The results also show that integration of

post disaster decisions with pre disaster decisions is important [13]. A stochastic approach is proposed to decide inventory amounts before disaster and sufficient amounts after the disaster. The problem includes uncertain demand, so a scenario based model is provided [14]. A mixed integer programming approach is presented for blood supply. The model includes some constraints based on uncertain demands, perishability products. Minimum cost of supply chain, maximum demand meeting, minimum time between production and consumption are expected in the objectives [15]. A disaster planning problem is presented by multi objective programming. They aim to take the location, inventory, distribution decisions for a flood disaster in Mexico [16]. Location warehouses, inventory levels in the pre disaster are decided, routing decisions are given in the post disaster. They solve the problems by two meta heuristic approach [17]. A model for deciding the relief locations and transportation is formulated. They aim to minimize pre disaster costs and unmet demands [18]. Distribution and routing decisions are investigated for emergency conditions by meta heuristic approach [19]. A mixed integer linear programming model is formulated for location-routing problem. They solve the problem by different meta heuristics [20]. The military supply is investigated by integer programming. Total supply chain costs and inventory levels are decided in the model [21].

In the literature, inventory routing problems are mostly studied. However, in this study, the problem is applied firstly for the post-disaster relief logistics. The reasons for this are as follows:

Managing products inventory after disasters is critical to avoid the stock-out situation.

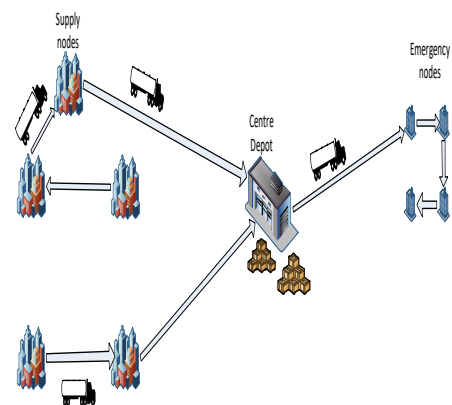
The inventory component carries a time dimension to the routing problems. In the humanitarian logistics, the distribution of the supplies needed considering available inventory levels at minimum time.

## Materials and Methods

Inventory routing problem concerned in this paper includes two sub problems: transportation of aid products and controlling inventory levels

to prevent stock out. The network of the paper comprises centre depots, supply nodes and emergency nodes shown in Figure 1. The centres must provide emergency products to the demand points.

In this study, in order to solve problems caused by the disaster, an inventory routing model is proposed. The proposed model solved the routes considering the inventory levels at minimum cost. As the greatest benefit, with this system, delivery of aid materials at emergency is markedly provided.



**Figure 1.** The proposed network in the problem

## Mathematical model

The indices used for mathematical modelling of the problem are as follows;

### Indices

- $i, j, v$  indices for supply or emergency nodes
- $E$  indice for emergency area
- $S$  indice for supply area
- $k$  index for supply or emergency vehicles
- $t$  index for periods
- $N_E$  set of emergency areas
- $N_S$  set of supply areas
- $K_E$  set of trucks for emergency areas
- $K_S$  set of trucks for supply areas
- $T$  set of periods in planning horizon  $T_0 = T \cup \{0\}$

The parameters and decision variables used are as follows;

**Parameters**

- $C_k^E (C_k^S)$ : Capacity of emergency (supply) vehicle  $k$  (unit)
- $l_i^E (l_i^S)$ : minimum inventory level of emergency (supply) node  $i$  (unit)
- $g_i^E (g_i^S)$ : maximum inventory level of emergency (supply) node  $i$  (unit)
- $f_k^E (f_k^S)$ : fixed usage cost for emergency (supply) vehicle  $k$  (money/period)
- $p$ : variable cost for transportation (money/distance)
- $h$ : holding cost for (money/(unit \* period))
- $d_{ij}^E (d_{ij}^S)$ : distance between  $(i, j)$  emergency (supply) pair (distance)
- $D^E (D^S)$ : maximum tour length for emergency (supply) vehicles
- $r_{it}$ : demand of emergency node  $i$  at period  $t$  (unit)
- $A(B)$ : number of emergency (supply) nodes

**Decision Variables**

- $I_{it}^S (I_{it}^E)$ : Inventory level on supplier (emergency) node  $i$  at period  $t$  (unit)
- $Q_{ikt}^S (Q_{ikt}^E)$ : Picked amount (delivery amount) from (to) supplier (supply) node  $i$  at period  $t$  with vehicle  $k$  (unit)
- $X_{ijkt}^E (X_{ijkt}^S)$ : Load on travelling  $(i, j)$  emergency (supplier) pair at period  $t$  with vehicle  $k$  (unit)
- $Y_{ijkt}^S = \begin{cases} 1, & \text{if a delivery made to } (i, j) \text{ supplier pair} \\ & \text{at period } t \text{ with vehicle } k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
- $U_{kt}^S = \begin{cases} 1, & \text{if vehicle } k \text{ is used for supply on period } t \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
- $Y_{ijkt}^E = \begin{cases} 1, & \text{if a delivery made to } (i, j) \text{ emergency pair} \\ & \text{at period } t \text{ with vehicle } k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
- $U_{kt}^E = \begin{cases} 1, & \text{if vehicle } k \text{ is used for delivery on period } t \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

*Model*

$$\min z = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{Ke} f_k^E * U_{kt}^E + \sum_{t=1}^T \sum_{i=0}^{Ne} \sum_{j=0}^{Ne} \sum_{k=1}^{Ke} c * l_{ij}^E * Y_{ijkt}^E + \sum_{t=1}^T \sum_{i=0}^{Ne} h * I_{it}^E$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{Ks} f_k^S * U_{kt}^S + \sum_{t=1}^T \sum_{i=0}^{Ns} \sum_{j=0}^{Ns} \sum_{k=1}^{Ks} c * l_{ij}^S * Y_{ijkt}^S + \sum_{t=1}^T \sum_{i=0}^{Ns} h * I_{it}^S$$
(1)

$$I_{it}^E = I_{it-1}^E - r_{it}^E + \sum_{k=1}^{Ke} Q_{ikt}^E \quad t \in \{1..T\}, i \in \{1..Ne\}$$
(2)

$$I_{0t}^S = I_{0t-1}^S - r_{0t}^E + \sum_{i=1}^{Ns} \sum_{k=1}^{Ks} Q_{ikt}^S - \sum_{i=1}^{Ne} \sum_{k=1}^{Ke} Q_{ikt}^E \quad t \in \{1..T\}$$
(3)

$$X_{ijkt}^E \leq C_k^E * Y_{ijkt}^E \quad i \in Nc, j \in Nc | i \neq j, t \in \{1..T\}, k \in Ke$$
(4)

$$\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{Ne} X_{jikt}^E - \sum_{\substack{v=1 \\ i \neq v}}^{Ne} X_{ivkt}^E = Q_{ikt}^E \quad k \in Ke, t \in \{1..T\}, i \in \{1..Ne\}$$
(5)

$$\sum_{k=1}^{Ke} \sum_{j=1}^{Ne} X_{0jkt}^E - \sum_{k=1}^{Ke} \sum_{i=1}^{Ne} X_{i0kt}^E = \sum_{k=1}^{Ke} \sum_{v=0}^{Ne} Q_{vkt}^E \quad t \in \{1..T\} \tag{6}$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{Ne} Y_{ijkt}^E - \sum_{\substack{v=1 \\ i \neq v}}^{Ne} Y_{jvkt}^E = 0 \quad k \in Ke, t \in \{1..T\}, i \in Ne \tag{7}$$

$$\sum_{i=0}^{Ne} \sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^{Ne} Y_{ijkt}^E * d_{ij}^E \leq D^E * U_{kt}^E \quad k \in Ke, t \in \{1..T\} \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^{Ne} Y_{0ikt}^E = U_{kt}^E \quad k \in Ke, t \in \{1..T\} \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^{Ne} Y_{i0kt}^E = U_{kt}^E \quad k \in Ke, t \in \{1..T\} \tag{10}$$

$$W_{ikt}^E - W_{jkt}^E + A * Y_{ijkt}^E \leq A - 1 \quad i \in \{1..Ne\}, j \in \{1..Ne\}, t \in T, k \in Ke \tag{11}$$

$$l_i^E \leq I_{it}^E \leq g_i^E \quad t \in T, i \in Ne \tag{12}$$

$$I_{0t}^E = I_{0t}^S \quad t \in T \tag{13}$$

$$I_{it}^S = I_{it-1}^S - \sum_{k=1}^{Ks} Q_{ikt}^S \quad t \in \{1..T\}, i \in \{1..Ns\} \tag{14}$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{Ns} X_{jikt}^S - \sum_{\substack{v=1 \\ i \neq v}}^{Ns} X_{ivkt}^S = -Q_{ikt}^S \quad k \in Ks, t \in \{1..T\}, i \in \{1..Ns\} \tag{15}$$

$$\sum_{k=1}^{Ks} \sum_{j=1}^{Ns} X_{0jkt}^S - \sum_{k=1}^{Ks} \sum_{i=1}^{Ns} X_{i0kt}^S = \sum_{k=1}^{Ks} \sum_{v=0}^{Ns} -Q_{vkt}^S \quad t \in \{1..T\} \tag{16}$$

$$X_{ijkt}^S \leq C_k^S * Y_{ijkt}^S \quad i \in Ns, j \in Ns | i \neq j, t \in \{1..T\}, k \in Ks \tag{17}$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{Ns} Y_{ijkt}^S - \sum_{\substack{v=1 \\ i \neq v}}^{Ns} Y_{jvkt}^S = 0 \quad k \in Ks, t \in \{1..T\}, i \in Ns \tag{18}$$

$$\sum_{i=0}^{Ns} \sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^{Ns} Y_{ijkt}^S * d_{ij}^S \leq D^S * U_{kt}^S \quad k \in Ks, t \in \{1..T\} \tag{19}$$

$$\sum_{i=1}^{Ns} Y_{0ikt}^S = U_{kt}^S \quad k \in Ks, t \in \{1..T\} \tag{20}$$

$$\sum_{i=1}^{Ns} Y_{i0kt}^S = U_{kt}^S \quad k \in Ks, t \in \{1..T\} \tag{21}$$

$$W_{ikt}^S - W_{jkt}^S + B * Y_{ijkt}^S \leq B - 1 \quad i \in \{1..Ns\}, j \in \{1..Ns\}, t \in T, k \in Ks \tag{22}$$

$$l_i^S \leq I_{it}^S \leq g_i^S \quad t \in T, i \in Ns \tag{23}$$

The objective function (Eq. 1) minimizes the total costs consist of fixed usage costs of vehicles, transportation and holding costs of both emergency and supply area. Inventory balances regarding incoming products and outgoing demands are ensured by Eq. 2 and 3. The Eq. 2 allows the balancing the inventory amount by considering the needs occurred in the disaster region. The Eq. 3 calculates the

amount from the supply area sent to the disaster area and the need finally. The Eq. 4 ensures that the vehicle capacity couldn't be exceeded. Eq. 5 and Eq. 6 allow the balancing of the helps distributed. While Eq. 5 ensures the distribution carried out for each point by vehicle, Eq. 6 allows the total distribution by the depot. Eq. 7-10 ensures the routing constraints. Eq. 7 allows the routing. Eq.8 provides that the route length cannot exceed the maximum tour length. Eq.9

and 10 ensure that the tour must start in the depot and finish in the same depot. Eq. 11 is a sub tour elimination constraint. Eq. 12 holds the inventory levels between the upper and lower limits. Eq. 13 is a transfer constraint which provides to transfer main supply depot's inventory levels to main emergency node's inventory level. Eq. 14 balances the inventory levels on supply nodes. Eq. 15 and 16 provide the pick-up amounts for supply nodes and main depot, respectively. Eq. 17-22 are routing constraints for supply nodes. While Eq. 17 forces to avoid from exceed capacity, Eq.19 forces to avoid from exceed of the maximum tour length. While Eq. 18 provides the routes, Eq. 20 and 21 ensures the tour must be start and end of the main depot. Eq. 22 is a sub-tour elimination constraint for supply nodes. Finally, Eq. 23 ensures the held inventory levels should be in a range of lower and upper limits.

**Results and discussion**

Van Province in Turkey is examined for post disaster management. After the earthquake, several rescue operations, aids are provided shown in Table 1. The staffs include search and rescue staffs and health personals. For first 24 hours, %81 of all the staffs is sent to the region. The vehicles sent to the region are trucks, ambulances and airplanes. For first 24 hours, %94 of all the vehicles is sent to the region. The materials are tents, blankets and stoves which are sent to the region for first 24 hours with % 77 rate. The relief work after the Van earthquake in 2011 is took place for the solution of the model. The proposed mathematical model is solved in GAMS mathematical modelling language on computers with 3.6 GHz processor and 16 GB RAM.

**Table 1. The provided post disaster activities (AFAD report)**

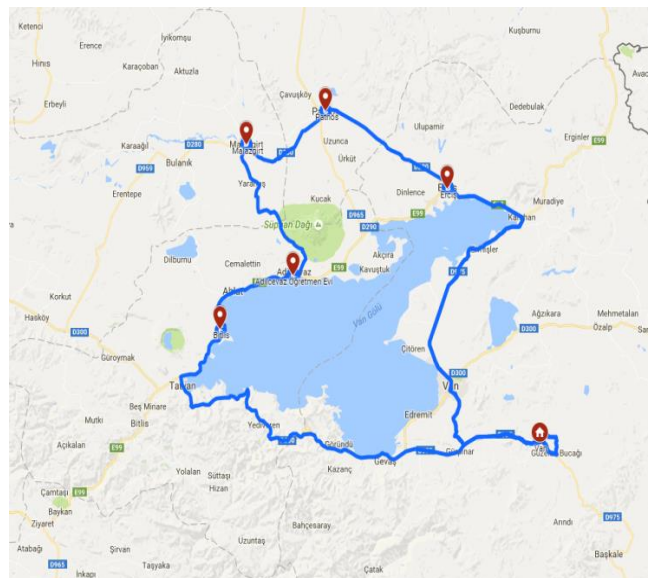
Post disaster activities	For first 24 hours	For first 72 hours
Number of staffs	3221	4615
Number of total vehicles	523	794
Number of materials	37585	103021

Accordingly, the model for the first 72 hours of relief work (3 days) is resolved. The results are given in Table 2, Figures 2-3.

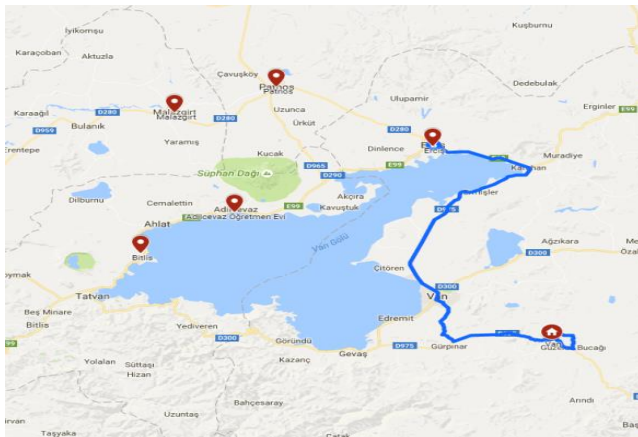
**Table 2. Inventory levels on emergency nodes**

Node	Period 1	Period 2
Malazgirt	16	5
Bitlis	16	5
Patnos	12	4
Adilcevaz	48	16
Erciş	97	699

Table 1 shows the amount of inventory at each point. When these quantities are evaluated, due to the inventory being kept, the demand that will be generated on the third day can be met from the stock and thus the lower logistics costs are ensured with the solution of the model.



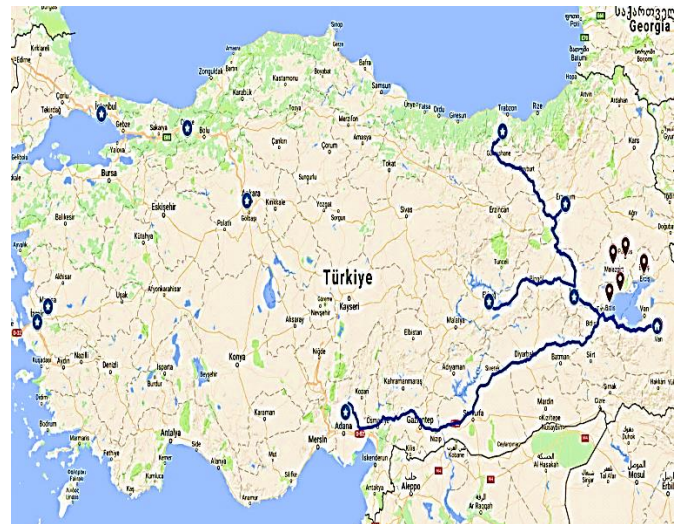
(a)



(b)

**Figure 2.** Routes on emergency nodes at (a) first period and (b) second period.

Figure 2 shows routes created between emergency points. The most important contribution of inventory keeping is seen in the formation of routes. Routes have been created only two days of the planning period.



(b)



(c)

**Figure 3.** Routes on supply nodes at (a) first period (b) second period and (c) last period.

Figure 3 shows routes between supply points. Considering the inventory quantities in each period, the needs are met from the nearest points. The result of establishing routes together between need and supply points is seen in the results. According to this, while there is no routing in the last period, supply is provided for the central depot requirement. Thus, it is possible to reduce the cost of routing.

### Sensitivity analysis

Model parameters are estimated in this section. Measuring the sensitivity of the model against possible forecast errors is important. For this reason, the sensitivity of the model to the following conditions is examined:

- Emergency vehicle capacity
- Supply vehicle capacity
- Emergency tour length
- Supply tour length
- Holding cost / routing cost

Emergency vehicle capacity and supply vehicle capacity values are set to 1000. A graph of the variation of this value between 500 and 1500 is shown in Figure 4. Accordingly, it is seen that the change in the value of Supply Vehicle capacity is more effective on the solution. This is an expected situation because long distances can be transported to these distribution points. Emergency vehicle capacity does not react very much to change. From the perspective of the solution times, it can be said that the decrease of vehicle capacities reduces the solution time.

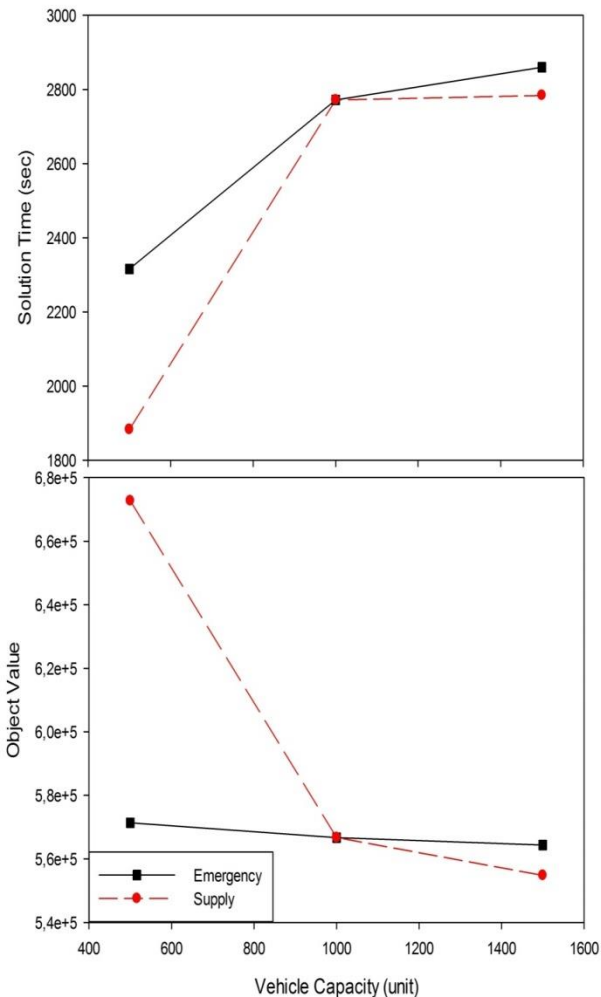


Figure 4. The effect of changes in the vehicle capacities to the solution times

Figure 5 shows the influence of the tour length on the resolution time. Accordingly, increasing

the tour length does not change the solution for the emergency vehicle. However, shortening the length of the tour increases the costs for supply vehicles. This is why a vehicle must travel a longer way when the tour lengths shorter. When the duration of the solution is examined, the increase in the length of the emergency tour increases the duration of the solution significantly. In terms of supply vehicles, it increases firstly and then decreases.

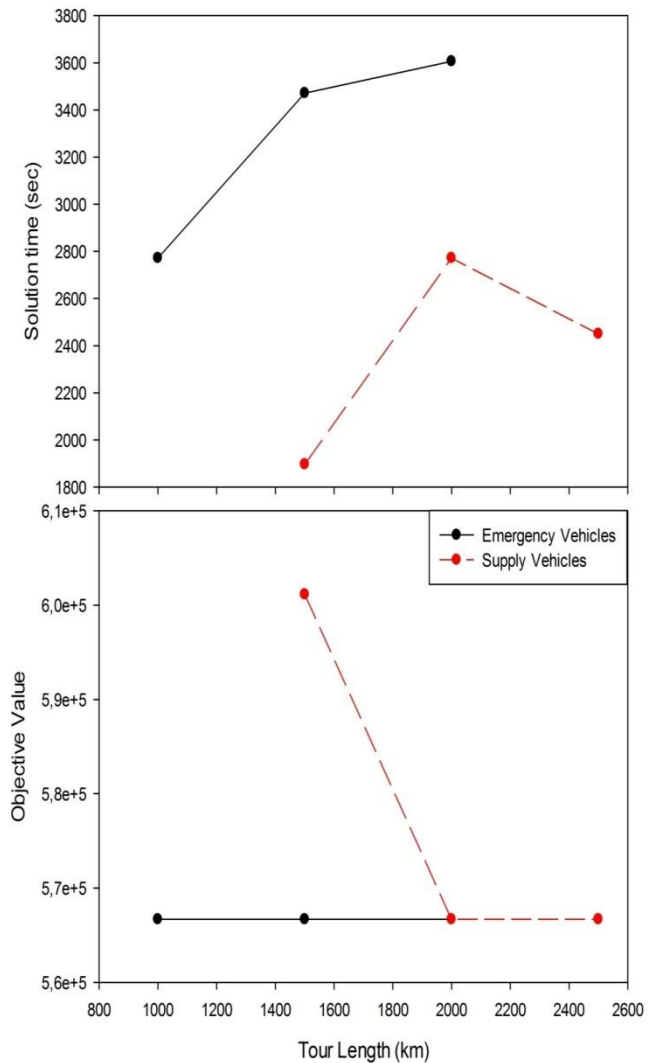
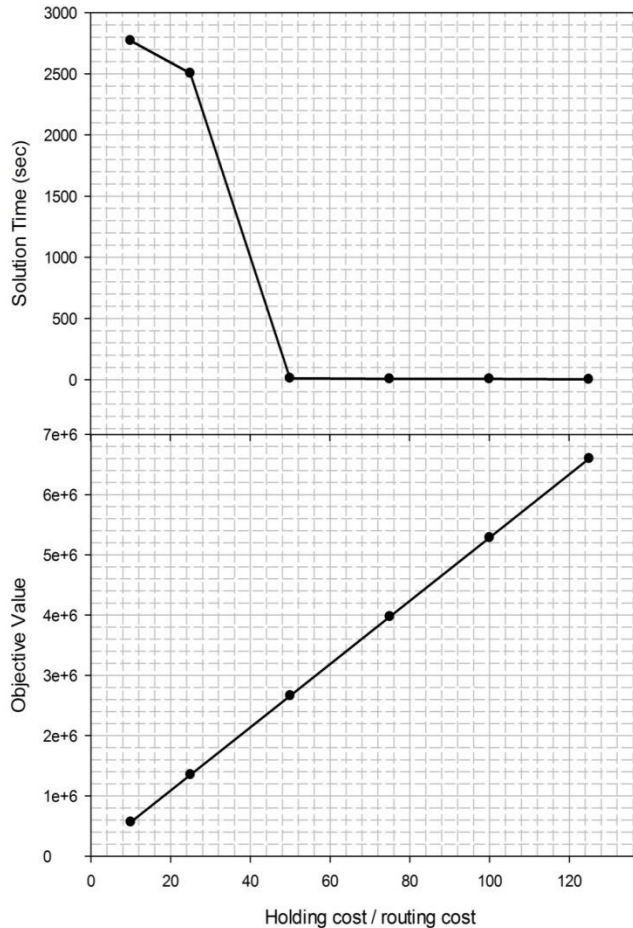


Figure 5. The effect of tour lengths to the solution

When the parameter effects of the parameters are examined, the last parameter is the ratio of the holding and routing costs. This ratio is one of the most important parameters in terms of solution duration of holding or transportation in every period. When the results presented in Figure 6 are examined, objective function cost increases. However, when the solution

durations are examined, it is observed that the increase does not affect the solution times after a significant reduction in the solution at a certain point. This point can be considered as the point at which the balance between holding and routing is completely broken.



**Figure 6.** The effect of holding cost / routing cost rate to the solution.

## Conclusion

Post disaster management is vital and includes several processes such as materials needed by affected people in the earthquake. Accurate planning of the processes requires a routing decision to distribute the materials timely and an inventory decision to hold the materials for the needs. This study aims to provide a mathematical model approach for realizing these activities. Model is applied for a real case study in a Van Province. Results are given by routes on emergency nodes and supply nodes, inventory levels on emergency nodes. A sensitivity analysis is also given to see the sensitivity of the model against the changes.

This study presents a mathematical model approach, for larger applications heuristic methods can be applied. Some uncertain conditions require stochastic or fuzzy approaches. Future works should address long-term economic development programs. Also, mitigation, preparation, response and recovery phases of the emergency management should be handled to reduce the impact of the hazards. Limitation of the study is that the model developed is only applied for a region and for post disaster processes. Future work may include national preparedness in the pre disaster stage and the results may be generalized for whole country.

## References

- [1] Coelho, L.C.; Cordeau, J.F.; Laporte, G. Thirty years of inventory routing. *Transportation science* **2013**, *48*, 1-19.
- [2] Kovács, G.; Spens, K.M. Humanitarian logistics in disaster relief operations. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* **2007**, *37*, 99-114.
- [3] Sheu, J.B. An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters. *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.* **2007**, *43*, 687-709.
- [4] Balcik, B.; Beamon, B.M. Performance measurement in humanitarian relief chains. *International Journal of Public Sector Management* **2008**, *21*, 4-25.
- [5] Döyen, A.; Aras, N.; Barbarosoğlu, G. A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics. *Optimization Letters* **2012**, *6*, 1123-1145.
- [6] Mete, H.O.; Zabinsky, Z.B. Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management. *International Journal of Production Economics* **2010**, *126*, 76-84.
- [7] Duran, S.; Gutierrez, M.A.; Keskinocak, P. Pre-positioning of emergency items worldwide for care international. *Forthcoming in Interfaces* **2010**, *41*, 223-237.
- [8] Vahdani, B.; Veysmoradi, D.; Noori, F.; Mansour, F. Two-stage multi-objective



- location-routing-inventory model for humanitarian logistics network design under uncertainty. *International Journal of Disaster Risk Reduction* **2018**, 27, 290-306.
- [9]Ozdamar, L.; Ekinci, E.; Kucukyazici, B. Emergency logistics planning in natural disasters. *Annals of Operations Research* **2004**, 129, 217-45.
- [10]Shen, Z.; Dessouky, M.; Ordonez, F. A two-stage vehicle routing model for large-scale bioterrorism emergencies. *Networks* 2009, 54, 255- 269.
- [11]Tofighi, S.; Torabi, S.A.; Mansouri, S.A. Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty. *European Journal Operation Research* **2016**, 250, 239–250.
- [12] Maghfiroh, M.F.N.; Hossain, M.; Hanaoka, S. Minimising emergency response time of ambulances through pre-positioning in dhaka city, bangladesh. *International Journal of Logistics Research and Applications*, **2017**, 21, 53-71.
- [13] Noham, R.; Tzur, M. Designing humanitarian supply chains by incorporating actual post-disaster decisions. *European Journal of Operational Research* **2018**, 265,1064-1077.
- [14] Hu, S.L.; Han, C.F.; Meng, L.P. Stochastic optimization for joint decision making of inventory and procurement in humanitarian relief. *Computer& Industrial Engineering* **2017**, 111, 39-49.
- [15] Samani, M.R.G.; Torabi, S.A.; Hosseini-Motlagh, S.M. Integrated blood supply chain planning for disaster relief. *International Journal of Disaster Risk Reduction* **2017**, 27, 168-188,
- [16]Rodríguez-Espíndola, O.; Albores, P.; Brewster, C. Disaster preparedness in humanitarian logistics: a collaborative approach for resource management in floods. *European Journal of Operational Research* **2018**, 264, 978–993.
- [17]Tavana, M.; Abtahic, A.R.; Di Caprio, D.; Hashemic, R.; Yousefi-Zenouzc, R. An integrated location-inventory-routing humanitarian supply chain network with pre- and post-disaster management considerations. *Socio-Economic Planning Sciences* **2018**.
- [18]Rezaei-Malek, M.; Tavakkoli-Moghaddam,R.; Zahiri, B.; Bozorgi-Amiri, A. An interactive approach for designing a robust disaster relief logistics network with perishable commodities. *Comput Ind Eng* **2016**, 94, 201–215.
- [19]Zhu, C.; Fang, G.; Wang, O. Optimization on emergency resources transportation network based on bayes risk function: a case study. *Math Probl Eng* **2016**.
- [20]Zhang, Y.; Qi, M.; Lin, W.H.; Miao, L. A meta-heuristic approach to the reliable location routing problem under disruptions. *Transportation Research E Logistics Transport Rev* **2015**, 83, 90–110.
- [21] Bastian, N.D.; Griffin, P.M.; Spero, E.; Fulton, L.V. Multi-criteria logistics modeling for military humanitarian assistance and disaster relief aerial delivery operations. *Optic Letters* **2016**, 10, 921–953.



# Artık malzemelerden Box Behnken test dizaynı kullanılarak hafif geopolimer beton üretimi

## Soner TOP\*

Abdullah Gül Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, Kayseri  
[soner.top@agu.edu.tr](mailto:soner.top@agu.edu.tr) ORCID: 0000-0003-3486-4184, Tel: +905424925150

## Hüseyin VAPUR

Çukurova Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Adana  
[hvapur@cu.edu.tr](mailto:hvapur@cu.edu.tr) ORCID: 0000-1234-5678-9012, Tel: +905057027123

Geliş: 29.04.2019, Revizyon: 23.05.2019, Kabul Tarihi: 28.05.2019

## Öz

*Bu çalışmada, artık malzemelerden hibrit geopolimer beton üretim olanakları araştırılmıştır. Bu amaçla, Sugözü Termik Santrali ve Afşin/Elbistan Termik Santrali'nden uçucu küller ile Soda Sanayii'nden Solvay Prosesi artıkları temin edilmiştir. Büyük çoğunluğu yüksek fırın cürufu ve uçucu küllerden oluşan CEM V/A kompoze çimento da geopolimer beton üretiminde kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin karakterizasyonu XRD ve XRF yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geopolimerizasyonu sağlamak üzere sodyum meta silikat ( $Na_2SiO_3$ ) alkali aktivatör olarak kullanılmıştır.  $Na_2SiO_3$  çözelti haline getirilerek 5M konsantrasyonunda harca katılmıştır. Harcın oluşturulması sırasında ekstra su kullanılmamıştır. Box Behnken İstatistiksel test dizaynı kullanılarak farklı oranlardaki artık malzeme ilavelerinin elde edilen geopolimer beton örneklerin tek eksenli basınç dayanımı, sertlik, birim hacim ağırlık, su emme ve sonik hız özelliklerine etkileri incelenmiştir. Kuadratik modeller, test sonuçları doğrultusunda Box Behnken test dizaynında en uygun modeller olarak belirlenmiştir.  $R^2$  değeri 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları için % 90,48, Shore sertlikleri için % 81,67, birim hacim ağırlıkları için % 94,85, su emme değerleri için % 92,09 ve sonik hız değerleri için ise % 87,74 olarak belirlenmiştir. Hibrit geopolimer beton üretimi sırasında 1570-1725 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen birim hacim ağırlıklarına sahip beton numunelerden 7-24 MPa arasında değişen tek eksenli basınç dayanımları elde edilmiştir. Elde edilen tüm geopolimer beton örnekler hafif beton sınıfında yer almıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer; Beton; Sonik hız; Dayanım; Artık.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

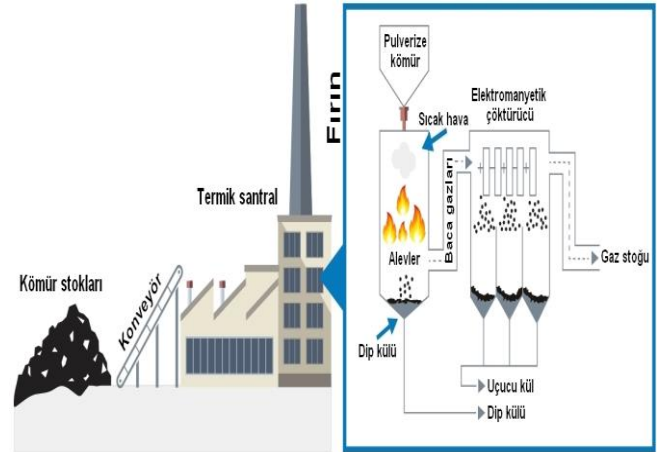
Güneş, rüzgar, dalga, akarsu, biyokütle ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji miktarları gün geçtikçe artsa da temel enerji üretim kaynağı olan fosil yakıtların kullanımı artan enerji ihtiyacı doğrultusunda yaklaşık olarak gelecek 100 yıl boyunca devam edecektir. Ayrıca, gelişen teknoloji ile baca gazı arıtma yöntemlerindeki ilerleme fosil yakıtların kullanımını çevreye daha duyarlı hale getirmektedir. Özellikle uçucu küllerin endüstriye kazandırılmasına yönelik uygulamalar ülkemizde bu malzemelerin sadece çimento-hazır beton tesislerinde kullanılması ile sınırlıdır.

Endüstriyel uygulamaların gelişmesine paralel olarak biriken artık malzemelerin daha çok değerlendirilmesi gün geçtikçe artan bir öneme sahiptir. Ülkemizde son 20 yılda bu tür artık malzemelerin değerlendirilmesine yönelik çalışmalar sınırlı ölçekte devam etmiştir. Artan çevresel kaygılar ülkelerin küresel ölçekte önlem almalarına yönelik çalışmaları da beraberinde getirmiştir. Ülkemizde de “Atık Yönetimi Yönetmeliği”, “Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik”, “Maden Atıkları Yönetmeliği” ve “Kum Çakıl ve Benzeri Maddelerin Alınması, İşletilmesi ve Kontrolü Yönetmeliği” gibi yönetmeliklerle artıkların kontrolü ve değerlendirilmesine yönelik mevzuat oluşturulması özellikle 2000 yılından sonra hız kazanmıştır.

Uçucu küller, termik santrallerde toz boyuta indirgenen (pulverize) kömürlerin yakılması ve bu kömürlerdeki karbon ile uçucu madde içeriklerinin kaybolması sonucu baca gazlarından siklon ve elektrofiltreler yardımıyla elde edilen (geriye kalan) toz boyuttaki partiküllerdir. Termik santraldeki fırınların alt kısmında elde edilen küller ise dip külü olarak isimlendirilmekte olup boyutları uçucu küllere nazaran oldukça yüksektir (Görhan vd., 2008). Uçucu küllerin tanecik boyutları 0,5-150 µm arasında değişmektedir. Siklon türündeki

ocaklarda yakılan kömürlerin suda soğutulması ile ise ham kül oluşabilmektedir (Türker vd., 2009).

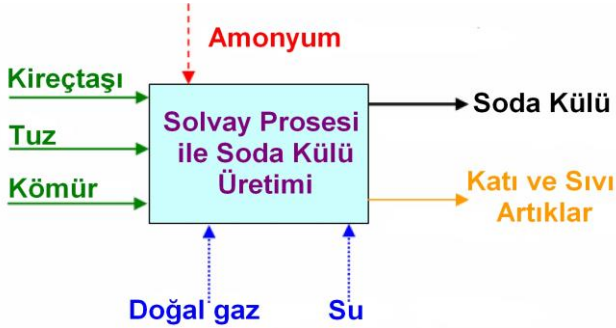
Tipik bir termik santral fırınındaki kül oluşumu Şekil 1’de görülmektedir. Uçucu küllerin yapısındaki majör bileşenler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CaO}$  olup bunların yüzdesi termik santrallerde kullanılan kömürün tipine göre farklılık göstermektedir. Uçucu küllerin yapısı ile morfolojisi değişkendir. Tane şekli de yüzey geriliminden ötürü küreseldir. Tanecik boyu ile yapısı soğutma hızından etkilenmektedir (Matsunaga vd., 2001). Uçucu küllerin bileşimleri genellikle kuvars, müllit ve hematitten, silika camı türü camsı bileşikler ile diğer oksitlerden meydana gelmiştir (Türker vd., 2009).



Şekil 1. Termik santraldeki küllerin oluşumu  
(Sephaku çimento, 2018)

Sodyum karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) olarak ta bilinen soda külü beyaz, kristalin ve nem çeken bir malzemedir. Soda külü; cam, sabun, deterjan, kağıt, kimyasal ve su arıtım sektörleri için önemli bir hammaddedir. Dünya soda külü üretimi 2011 yılında 63 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Dünya soda külü üretiminin yaklaşık % 45’i Solvay Prosesi’nden karşılanmakta iken % 24’ü ise doğal trona yataklarından sağlanmaktadır. Dünyada 70 civarında Solvay Prosesi ile soda külü üreten tesis bulunmaktadır. Solvay Prosesi’nde ana hammadde olarak tuz, kireçtaşı, kok kömürü veya antrasit kullanılmaktadır (Şekil

2). Amonyum döngüsel eleman olarak kullanılırken, doğal gaz ve su da belirli oranlarda kullanılabilir (Yeğinobalı, 1990; Gür vd., 2012).

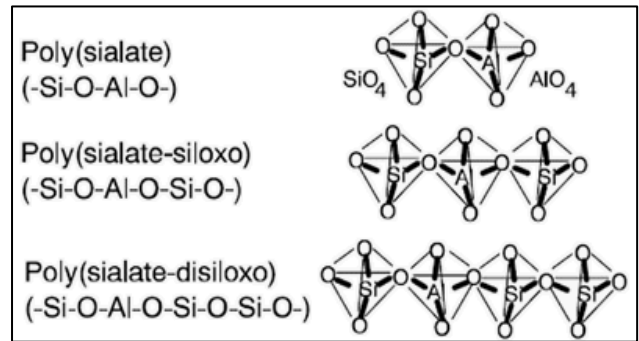


Şekil 2. Solvay Prosesi akım şeması

Geopolimerler, portland çimentolu betonların yerini alabilecek derecede umut vadeden malzemelerdir (Abdel-Ghani vd., 2018; Cheng vd., 2018; Zhang vd., 2018). Portland çimentonun en önemli dezavantajı insanlar tarafından oluşturulan CO<sub>2</sub>'in %5-7 civarındaki miktarlarının portland çimento üretiminden kaynaklanmasıdır (Shen vd., 2015; Rolfe vd., 2018). Portland çimento üretimi sırasında CO<sub>2</sub> emisyonları sadece klinker üretimi sırasındaki kalsinasyon işlemiyle değil aynı zamanda kalsinasyon ısını sağlamak amacıyla kullanılan fosil yakıtlardan da kaynaklanmaktadır. İki proses de CO<sub>2</sub> emisyonlarından eşit derecede sorumludur (McNulty, 2009; Maddalena vd., 2018). Geleneksel Portland çimentosu ile kıyaslandığında geopolimerler yangın geçirmezlik, düşük fiyat, çevresel duyarlılık, ses absorplama gibi üstün özelliklere sahiptir (Pan vd., 2018; Askarian vd., 2018).

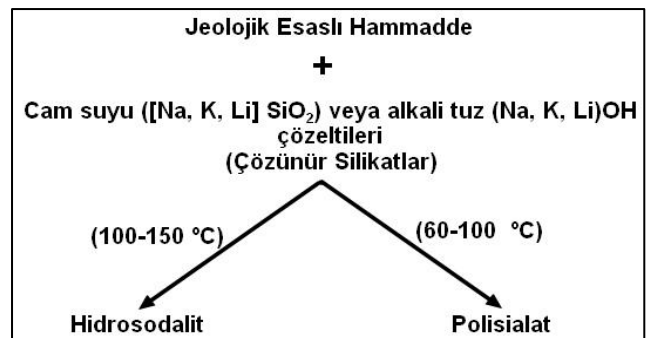
İlk defa, toprak mineral esaslı çoğu malzemelerin patentlerine de sahip olan Davidovits tarafından tanımlanan geopolimerler 3 boyutlu poly (sialate), poly (sialate-siloxo) ve poly (sialate-disiloxo) polimerik zincirlerini oluşturan AlO<sub>4</sub> ve SiO<sub>4</sub> dörtyüzlülerini içermektedir (Davidovits, 1991, Sisol vd., 2014). Geopolimer yapıların moleküler dizimleri Şekil 3'te görülmektedir. Geopolimerizasyon reaksiyonu katı alüminasilikat oksitler

(mineraller ve inorganik yan ürünler) ve alkali metal silikat çözeltileri (NaOH, KOH vb.) arasında, orta derecedeki ısılarda (20-150 °C) ve yüksek bazik kondüsyonlarda, Si-O-Si ve Si-O-Al sistemlerini içeren polimerik amorf veya yarı kristalin yapıları kurmalarıyla oluşmaktadır (Yun-ming vd., 2016). Geopolimer kimyası zeolit kristallerinden farklı olarak daha amorf bir tanecik yapısına sahiptir. Şekil 4'te geopolimer malzemelerin elde edilmesinde uygulanan prosedür özetlenmiştir.



Şekil 3. Polisialatların moleküler dizimleri (Connie ve ark., 2018)

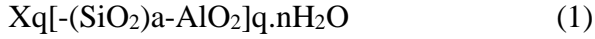
Polisialatlar ile hidrosodalitler üç boyutlu hegzagonal molekül dizilimindedir. Polikondensasyon sonucunda suyu dehidratasyon ve dehidrasyon yoluyla vererek zeolit kayaçlarına benzer tanecik yapısına ulaşırlar.



Şekil 4. Geopolimer malzeme eldesine yönelik akım şeması

Zeolit kristallerinden farklı olarak üç boyutlu hegzagonal amorf moleküler bağ yapıda olan alüminosilikat toprak malzemeler geopolimerlerdir (Keyte ve ark., 2004). Geopolimerlerin basit formülasyonu aşağıda

verilmiştir.



Burada; X metal katyonu ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  or  $\text{Na}^+$ ), a 1, 2 veya 3, q ise polikondansasyon (çoklu yoğunlaşma) derecesidir. Uçucu küller, metakaolinler, cam artıkları, kırmızı çamur, tarım endüstrisi yan ürünlerinin külleri (hinditan cevizi, şeker kamışı, pirinç çeltiği vb.), ferrokrom cürufları, beton yıkım artıkları geopolimer beton üretmek için kullanılan alüminasilikat içeren bazı malzemelerdir (Nikolic vd., 2018; Bai vd., 2018; Hajimohammadi vd., 2018; Ascensao vd., 2017; Hassan vd., 2018; Arulrajah vd., 2017; Patel ve Shah, 2018; Karakoç vd., 2016; Vasquez vd., 2016).

Queensland Üniversitesi Global Change Enstitüsü binası tamamen uçucu kül ve yüksek fırın cüruflarından elde edilen geopolimer betonlarla inşa edilmiştir. Güney Queensland'da Brisbane West Wellcamp Havaalanı 70000 ton geopolimer beton kullanılarak kurulmuş ve 2014'te hizmete açılmıştır (Rangan, 2014). Dünya çapında geopolimer beton üretimi yapan onlarca şirket bulunmaktadır (Renca, 2019; Wagners, 2019; Kıran, 2019; Lucideon, 2019).

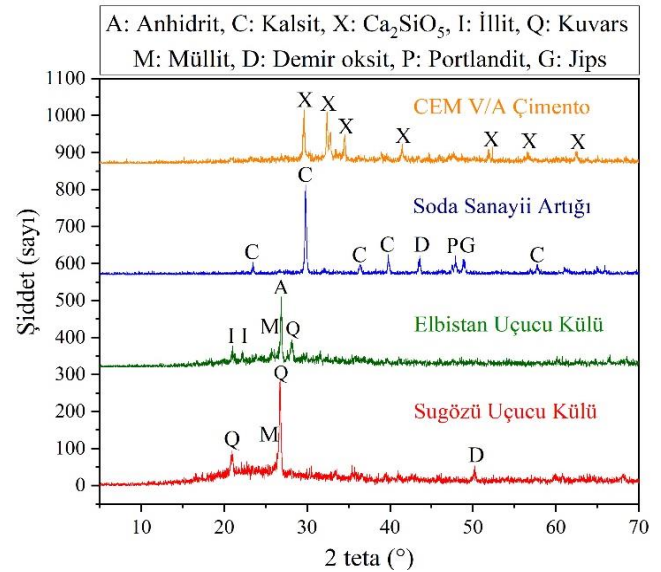
Bu çalışmada termik santral ve soda sanayii tesis artıklarından geopolimer yapı malzemelerinin üretimi araştırılmıştır. Box Behnken test dizaynı kullanılarak farklı oranlarda eklenen artık malzemelerden oluşan geopolimer betonların dayanım özellikleri araştırılmıştır.

## Malzemeler ve Yöntem

### Malzemeler

Çalışmaya konu olan uçucu küller Adana'nın Yumurtalık İlçesi'ndeki Sugözü Termik Santrali'nden, Kahramanmaraş'ın Afşin ve Elbistan İlçeleri'nde konumlanan Afşin Elbistan Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Ayrıca Mersin Soda Sanayii A.Ş.'den Solvay Prosesi'nde ortaya çıkan yüksek  $\text{CaCO}_3$  içerikli artıklar temin edilmiştir. CEM V/A 32,5 R kompoze çimento Adana Çimento A. Ş.'den temin edilmiştir. Geopolimerizasyonu sağlamak

üzere TEKKİM kimyasal A. Ş.'den minimum % 95 tenörlü sodyum meta silikat (susuz) temin edilmiştir. Sodyum meta silikat % 49,5  $\text{Na}_2\text{O}$  ve % 46  $\text{SiO}_2$  içermektedir. Çalışmalarda kütlece minimum % 50'si yüksek fırın cürufu ve uçucu küllerden oluşan CEM V/A 32,5 R sınıfı kompoze çimento kullanılmıştır. Bu şekilde oluşturulacak beton blokların tamamına yakınının artık malzemelerden imal olması amaçlanmıştır. XRD (Rigaku Minflex) analizleri incelendiğinde Sugözü uçucu küllerinin çoğunlukla müllit ( $\text{Al}_{4.8}\text{Si}_{1.2}\text{O}_{9.6}$ ) ve kuvarstan ( $\text{SiO}_2$ ), Soda Sanayii artıklarının ise büyük ölçüde kalsiyum karbonattan ( $\text{CaCO}_3$ ) oluştuğu görülmektedir (Şekil 5). Elbistan uçucu küllerinin anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ), müllit ve illit türü kilerden oluştuğu belirlenmiştir. Deneylede kullanılan CEM V/A türü çimentoların ise kalsiyum silikat ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_5$ ) içeriklerinden meydana geldiği XRD analizi ile ortaya konmuştur.



Şekil 5. Kullanılan malzemelerin XRD patternleri

Tablo 1'de kullanılan malzemelerin XRF (X ışını flüoresans) analizleri ile belirlenen içerikleri görülmektedir. Minipal 4 Panalytical marka XRF cihazı kullanılmıştır. Elbistan uçucu küllerindeki kükürt içeriğinin anhidritin yapısında bulunan sülfattan geldiği görülmektedir. Ayrıca Soda Sanayii artıklarında Solvay Prosesi uyarınca  $\text{CaCl}_2$ 'ün artık olarak büyük çoğunluğu alması gerekirken klorür oranının oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Kullanılan malzemelerin kimyasal içerikleri

İçerik	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SrO	BaO	ZrO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Cl <sub>2</sub>	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	KK <sup>#</sup>
<b>Sugözü Uçucu Külleri</b>	55,20	24,10	5,50	8,11	LA*	1,62	1,44	0,27	0,26	0,19	2,34	LA*	LA*	LA*	LA*	2,34
<b>Elbistan Uçucu Külleri</b>	8,69	4,10	63,49	4,32	LA*	LA*	0,46	0,11	0,24	LA*	15,62	LA	LA	LA	0,11	2,32
<b>Soda Sanayii Artıkları</b>	1,26	LA*	47,78	0,98	LA*	LA*	0,08	LA*	0,24	LA*	1,85	1,71	1,25	2,54	LA*	41,2
<b>CEM V/A Cimento</b>	18,71	5,10	61,20	3,59	0,24	0,91	0,57	LA*	0,21	LA*	3,20	LA*	LA*	LA*	LA*	4,68

\*Dedeksiyon limiti altında, #Kızdırma kaybı

Bunun başlıca nedeni Mersin'deki Soda Sanayii üretim tesislerinde mevcut yönetmeliklere uygunluk açısından klorür oranını düşürmeye yönelik devreye alınan ek yıkama prosesidir. Bu işlem sonucunda artıklardaki klorür oranının düşürülmesi sağlanmaktadır.

Sugözü uçucu küllerinin tamamı 80 µm boyutu altında iken elbistan uçucu küllerinin tamamı 200 µm boyutu altındadır. Soda Sanayii artıkları kimyasal tepkime sonucu oluşan malzemeler olduğundan boyutları uçucu küllere kıyasla çok daha düşüktür (-50 µm). Elbistan uçucu küllü 2,85 g/cm<sup>3</sup>, Sugözü uçucu küllü 2,33 g/cm<sup>3</sup> ve Soda Sanayii artığı 2,35 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahiptir.

### Yöntem

Tek eksenli basınç dayanımını ölçmek amacıyla ELE marka beton presi kullanılmıştır (Şekil 6). ASTM C109 / C109M standardı uyarınca yüklemenin yapılacağı bölüme kübik numuneler yerleştirilmiş ve bilgisayar aracılığıyla yükleme işlemi gerçekleştirilmeye başlamıştır. Yükleme hızı 200 kgf/sn olarak seçilmiştir. Kübik numune kırıldığında basınç dayanımı deneyi sonlandırılmıştır.

Dayanım değerleri aşağıdaki formülasyondan hesaplanmış olup; P: Kırılmaya sebep olan eksenel kuvvet (kgf) ve A ise kuvvet uygulanan kesit alan (cm<sup>2</sup>) olarak alınmıştır. Bu formülasyondan dayanım (σ) MPa olarak belirlenmiştir.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2)$$



Şekil 6. Tek eksenli basınç dayanımının belirlendiği cihaz

Numunelerin sertliklerinin belirlenmesi için Shore Skleroskobu kullanılmıştır. Shore skleroskobunda sertliği ölçülecek malzemenin plastik davranış özelliğinden yararlanılmaktadır. Belirli yükseklikten bırakılan çekiçteki elmas uç malzemeye teması sonrası sertliğe bağlı olarak belirli yüksekliğe çıkmaktadır. Ölçümü gerçekleştirilecek malzemenin yüzeyi düz olmalıdır. 28 günün sonunda kübik numunelerin her bir yüzeyinden 10'ar tane ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalamaları Shore sertliği olarak kaydedilmiştir. Beton kübik blokların su emme değerleri ASTM C642-13 standardına göre belirlenmiştir. Su altında bekletilen numunelerin su emme miktarları not edilerek iki ölçüm arasındaki farkın % 0,5'ten düşük olduğu günde deney sonlandırılmıştır. Numunelerin sonik hızları Pundit sonik hız cihazı kullanılarak hesaplanmıştır. Cihazın alıcı ve vericisi arasına öncelikle cihazın kalibrasyonunu sağlayan

referans örneği konularak kalibrasyonu sağlanmıştır. Sonrasında alıcı ve verici arasına kübik örnekler yerleştirilerek 3 farklı boyutta hız ölçümleri alınmıştır. Dalgaların daha iyi iletilmesi adına numunelerin yüzeyine gres yağı sürülmüştür. Ölçümlerin ortalama değeri hesaplanarak aşağıdaki formülasyona göre Pundit sonik hız değeri hesaplanmıştır.

$$V_p = \frac{L}{T_p} \quad (3)$$

Burada; L, numunenin uzunluğu (mm), T<sub>p</sub>, cihazdan ölçülen değer (µs) ve V<sub>p</sub> ise P dalgasının yayılma hızıdır (km/sn).

Testlerde, George E. P. Box ve Donald Behnken tarafından 1960'ta geliştirilen yanıt yüzeyi metodolojisini içeren deney dizaynı olan Box Behnken test dizaynı kullanılmıştır. Yanıt yüzeyi metodolojisi temelde Box Behnken ve merkezi kompozit dizaynı içeren 2 yöntemi barındırır. Merkezi kompozit dizaynda 5 düzey bulunurken Box Behnken dizaynında 3 düzey bulunur (Tekindal vd., 2012). Her bir faktör veya bağımsız değişken, genellikle -1, 0, +1 olarak kodlanan, eşit aralıklı üç değerden birine yerleştirilir. Box Behnken deney tasarımının oluşturulmasında ve deney sonuçlarının açıklanmasında Design Expert 11 istatistiksel bilgisayar programı kullanılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Uygulanan Box Behnken deney dizaynı

Deney no	A:	B: Elbistan	C:
	Soda Sanayii Artıkları (%)	Uçucu Külleri (%)	CEM V/A Çimento (%)
1	30	30	20
2	10	30	20
3	10	10	20
4	20	30	10
5	30	20	30
6	30	20	10
7	20	20	20
8	20	20	20
9	20	10	30
10	10	20	30
11	20	20	20
12	30	10	20
13	20	30	30
14	20	10	10
15	10	20	10

Katı oranı Sugözü uçucu külü ilavesi ile 100'e tamamlanmıştır. Tüm deneylerde katı oranları ağırlıkça % 60 olarak alınmıştır. 5 M Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> içeren bazik çözelti kullanılmıştır. Çözeltilerin

hazırlanmasında musluk suyu kullanılmıştır. Çözeltiler harç karışımı oluşturulmadan 30 dakika önce hazırlanmıştır. Harç karışımı hazırlandıktan hemen sonra 5 x 5 x 5 cm boyutlarındaki 3 gözlü kalıplara dökülmüştür. Kalıplara dökülmeden önce karışım 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Kalıplardan beton blokların kolay çıkarılması için ince bir tabaka halinde gres yağı kullanılmıştır. Kalıplara 3 dakika boyunca vurularak harçların içinde sıkışmış olabilecek havanın çıkarılması sağlanmıştır. Harçlar kalıplara döküldükten sonra kalıplar 70 °C'deki etüve yerleştirilmiş ve 1 gün süreyle etüve bırakılmıştır. Sonrasında kür işlemi oda sıcaklığında devam ettirilmiştir. 28. günde tek eksenli basınç dayanımları, su emme, Shore sertlik ve Pundit sonik hız değerleri kullanılarak 3 boyutlu grafikler oluşturulmuştur. Tüm deneyler tekrarlıdır. Deneylerde kullanılan artık malzemelerin boyutları ince olduğundan ve büyük çoğunluğu atıklardan oluşan geopolimer beton üretilmesi amaçlandığından ötürü ilave iri agrega kullanımı tercih edilmemiştir.

## Sonuçlar ve Tartışma

Box Behnken test dizaynı doğrultusunda gerçekleştirilen testlerden elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Uygulanan deneylerin sonuçları

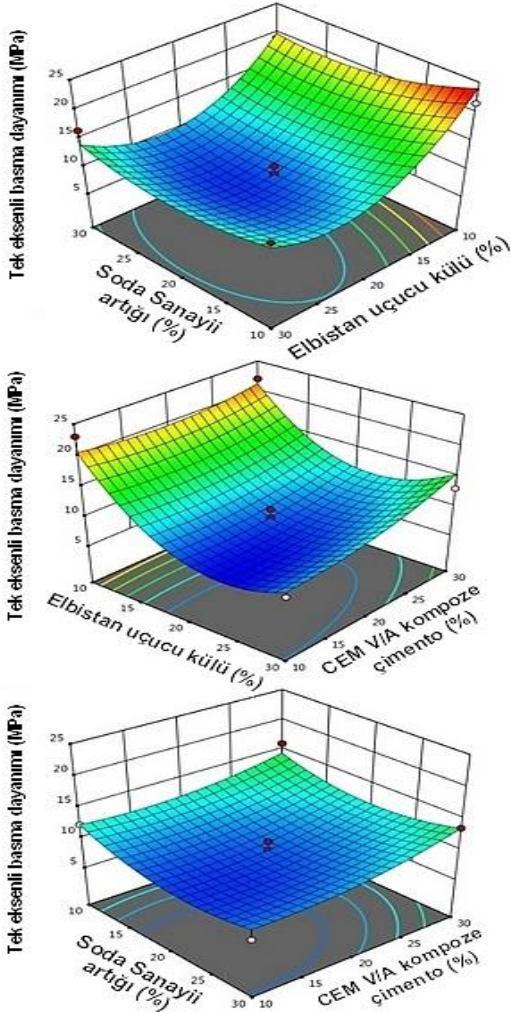
Test no	Dayanım (MPa)		Birim hacim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Su emme (%)	Sonik hız (km/sn)	Shore sertliği
	1 gün	28 gün				
1	14,48	16,50	1680	7,60	2,60	21
2	10,32	14,30	1674	10,60	2,30	15
3	18,09	21,56	1725	1,50	3,10	31
4	7,35	9,15	1657	10,20	2,10	14
5	11,57	13,56	1586	7,30	2,40	20
6	7,11	7,85	1600	10,90	2,12	16
7	6,73	8,95	1578	9,89	2,25	13
8	7,49	7,46	1600	10,81	2,18	17
9	19,49	22,06	1659	4,90	3,15	41
10	12,44	16,05	1674	6,40	2,98	32
11	9,56	10,40	1598	8,60	2,10	16
12	14,75	19,05	1576	4,90	2,89	20
13	10,63	13,05	1602	5,79	2,40	17
14	19,96	23,06	1603	2,00	3,42	43
15	9,51	12,24	1599	6,40	2,35	17

28 günlük tek eksenli basınç dayanımlarına dayalı olarak oluşturulan 3 boyutlu grafiklerde de görüldüğü üzere Elbistan uçucu külü ve Soda sanayii artığı ilavesi dayanımları azaltırken CEM

V/A kompoze çimento ilavesi ile dayanımlar artmıştır. Elbistan uçucu külündeki artışla dayanımlardaki düşüşler çok yüksek iken Soda sanayii artığı miktarındaki artışla dayanımdaki azalmalar daha az olmuştur. Afşin Elbistan uçucu külündeki anhidritin su ile teması sonucu jipse dönüşümünün dayanımdaki azalmanın temel nedeni olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Elbistan uçucu külündeki illit kil mineralinin su ile teması sonucu anhidritle birlikte şişmesinin de dayanımın azalmasının sebepleri olarak görülmektedir (Şekil 7).

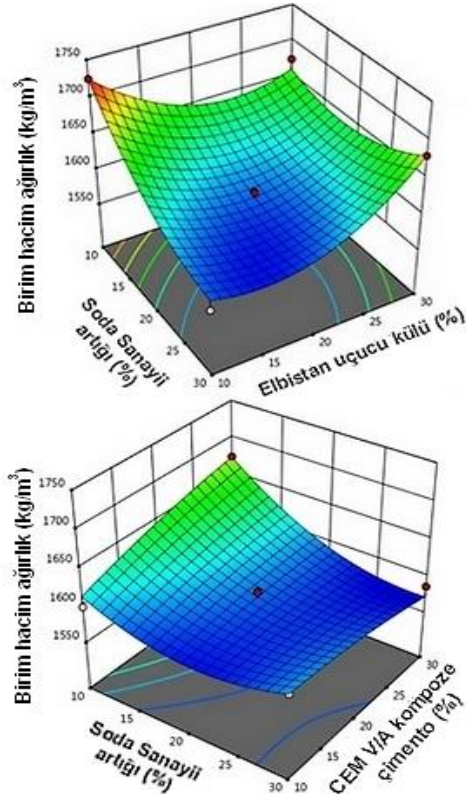
külü oranlarındaki artış ise birim hacim ağırlıklarda artışa sebep olmuştur. CEM V kompoze çimento miktarındaki artış birim hacim ağırlıklarda kayda değer bir değişime sebep olmamıştır. 28. gün sonunda beton örneklerin su emme değerleri % 1,5 ile %10,9 arasında değişmektedir. Elbistan uçucu külü ve soda sanayii artığı ilavesindeki artışların betonların su emme değerlerini artırdığı görülmüştür.

Ayrıca CEM V/A çimento ilavesindeki artışla su emme değerlerinin azaldığı belirlenmiştir(Şekil 9).

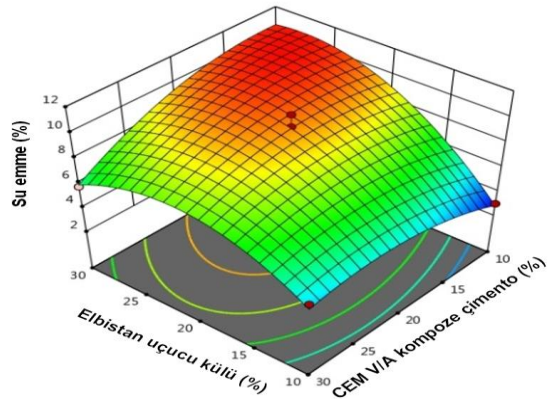


Şekil 7. Geopolimer beton örneklerin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları

Şekil 8'den anlaşılacağı üzere Soda Sanayii artığının miktarındaki artış betonun birim hacim ağırlığında azalmaya neden olmuştur. Soda sanayii artığının yoğunluğu  $2,35 \text{ g/cm}^3$  olmasına rağmen yığın yoğunluğunun düşük olması ( $620 \text{ kg/m}^3$ ) bu sonucu doğurmuştur. Elbistan uçucu



Şekil 8. Geopolimer betonların 28 günlük birim hacim ağırlıkları

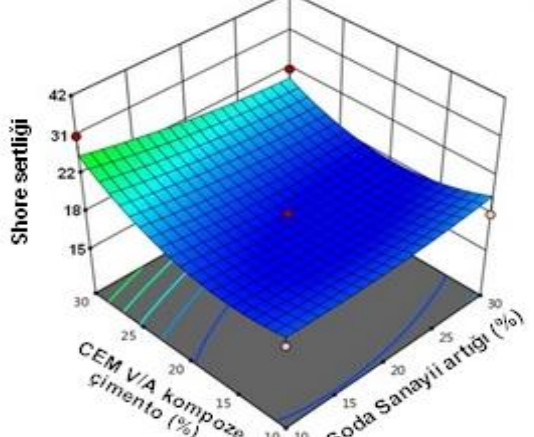
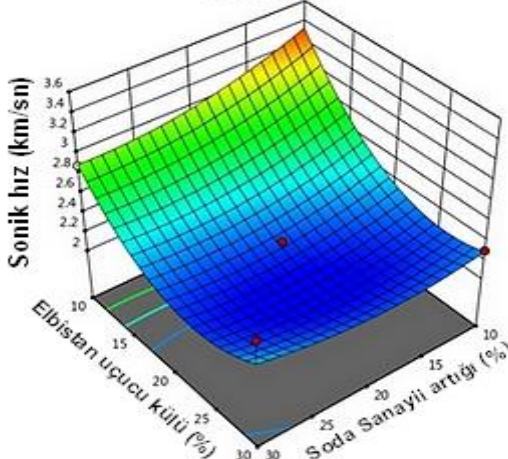
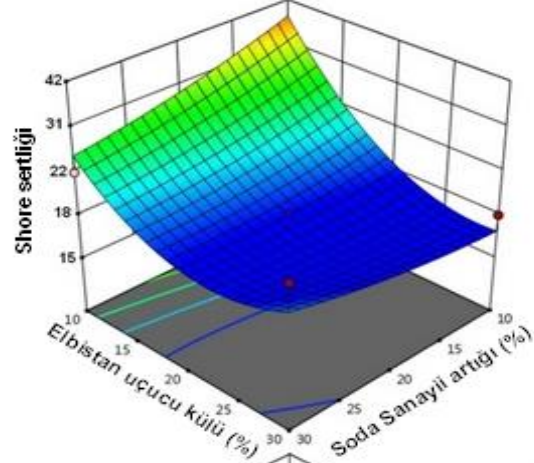
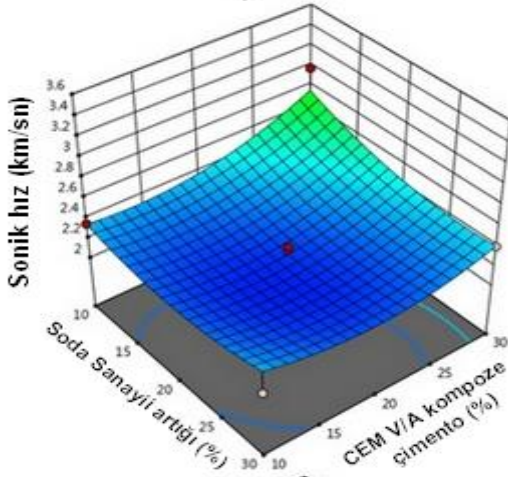
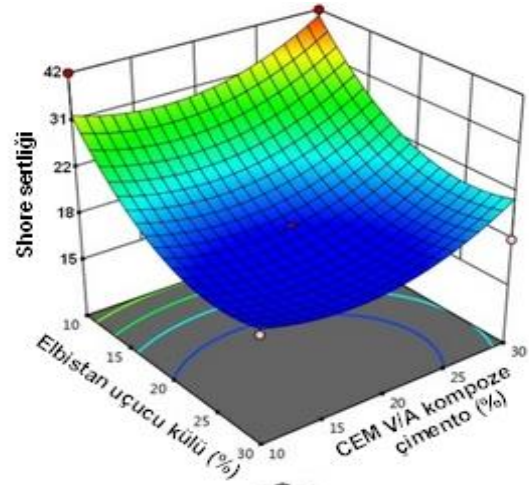
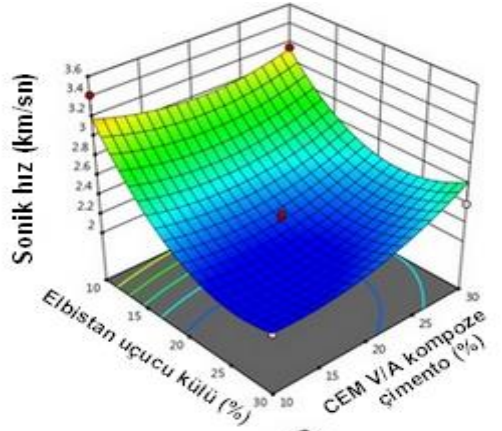


Şekil 9. Geopolimer betonların su emme değerleri (28. gün için)



En yüksek su emme değerlerinin Elbistan uçucu külünün en çok ve CEM V/A kompoze çimentonun en az oranda kullanıldığı beton örneklerde elde edildiği saptanmıştır.

durum gözlenmesine rağmen hız düşüşü Elbistan uçucu küllerine oranla çok daha düşük olmuştur. CEM V/A kompoze çimento ilavesinin hızlara olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Geopolimer beton örneklerin sonik hız değerleri (28. günde)

Şekil 11. Geopolimer betonların 28. günde Shore sertlik değerleriyle oluşturulan grafikler

Sonik hız değerleri ile oluşturulan 3 boyutlu grafikler incelendiğinde Elbistan uçucu külü ilavesindeki artışın hızları düşürdüğü görülmüştür. Soda sanayii artığında da aynı

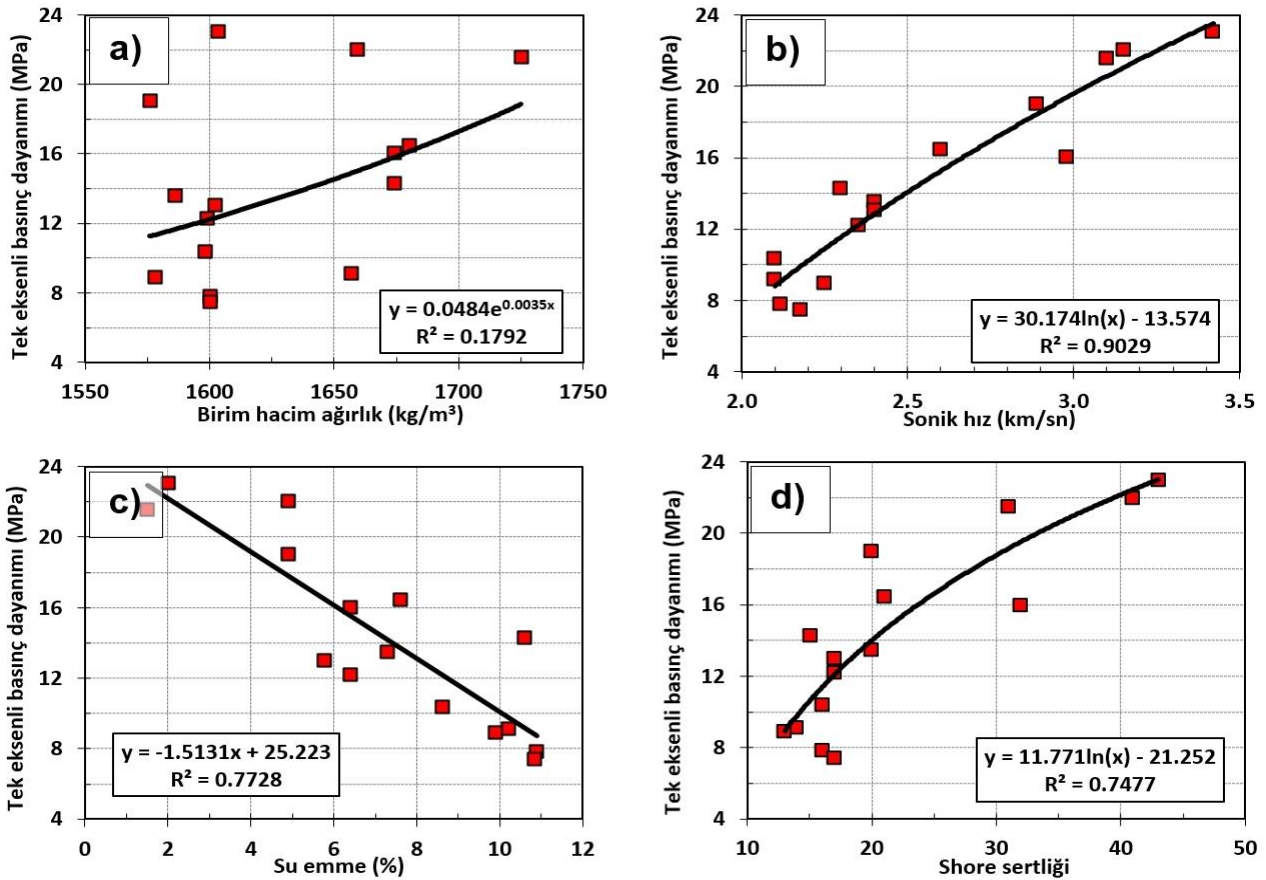
Şekil 11'deki Shore sertlik değerleri uyarınca oluşturulan grafikler incelendiğinde en sert beton örneklerin en az Elbistan uçucu külü ve en çok

CEM V/A kompoze çimento ve Sugözü uçucu külü içeren beton örnekler olduğu belirlenmiştir. En düşük sertliğe sahip örnekler ise Elbistan uçucu külünün en çok oranda kullanıldığı beton bloklar olarak belirlenmiştir. 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı değerleri doğrultusunda ANOVA analizi sonucu Quadratik model ile aşağıdaki denklem üretilmiştir. Quadratik model diğer parametreler için de en uygun model olarak seçilmiştir.  $R^2$  değeri 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları için % 90,48, Shore sertlikleri için % 81,67, birim hacim ağırlıkları için % 94,85, su emme değerleri için % 92,09 ve sonik hız değerleri için ise % 87,74 olarak belirlenmiştir.

**28 günlük dayanım (MPa)**= $8,94-0,89*\text{soda sanayi artığı}-4,09*\text{elbistan uçucu külü}+1,55*\text{CEM V/A çimento}+1,18*\text{soda sanayi artığı}*\text{elbistan uçucu külü}+0,47*\text{soda sanayi artığı}*\text{CEM V/A çimento}+1,23*\text{elbistan uçucu}$

$\text{külü}*\text{CEM V/A çimento}+2,26*(\text{soda sanayi artığı})^2+6,66*(\text{elbistan uçucu külü})^2+1,23*(\text{CEM V/A çimento})^2$

Box Behnken deney dizaynından elde edilen geopolimer beton örneklerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri ile birim hacim ağırlık, sonik hız, su emme ve Shore sertliği değerleri arasındaki ilişki Şekil 12’de verilmiştir. Basınç dayanımları ile sonik hız ve Shore sertliği değerleri arasında pozitif korelasyon bulunmakta iken basınç dayanımları ve su emme değerleri arasında ise negatif korelasyon bulunmaktadır. Tek eksenli basınç dayanımları ile birim hacim ağırlıklar arasında ise kayda değer bir ilişkinin olmadığı gözlenmiştir. Beton örneklerle gerçekleştirilen önceki çalışmalarda benzer korelasyon değerleri elde edilmiştir (Kılıç vd., 2010; Latif Al-Mufti ve Fried, 2012; Güneylü vd., 2017; Kılıç vd., 2018).



Şekil 12. 28. gün tek eksenli basınç dayanımları ile birim hacim ağırlık (a), sonik hız (b), su emme (c) ve Shore sertlik (d) değerleri arasındaki ilişki

## Çıkarımlar

Bu çalışma büyük çoğunluğu artık malzemelerden oluşan geopolimer betonların üretilebileceğini göstermiştir. Çalışma kapsamında Sugözü uçucu külleri, Afşin/Elbistan uçucu külleri, Soda Sanayii Solvay Prosesi artıkları ve büyük çoğunluğu yüksek fırın cürüfları ve uçucu küllerden oluşan CEM V/A kompoze çimento kullanılarak hibrit geopolimer betonlar elde edilmiştir. Box Behnken test dizaynı kullanılarak 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları esas alınıp geopolimer beton üretimine yönelik quadratik model ( $R^2 = \% 90,48$ ) oluşturulmuştur.

Hibrit beton üretimi sırasında 1570-1725  $\text{kg/m}^3$  arasında değişen birim hacim ağırlıklarına sahip beton numunelerden 7-24 MPa arasında değişen tek eksenli basınç dayanımları elde edilmiştir. Elde edilen tüm geopolimer beton örnekler hafif beton sınıfında yer almaktadır. Ayrıca elde edilen tüm geopolimer beton örnekler dayanımları doğrultusunda yalıtımlarda ve hafif yapılarda kullanılabilecek özelliklerdedir.

## Teşekkür

Bu çalışma Dr. Soner TOP'un doktora tezinin ürünüdür. Yazarlar desteklerinden ötürü Yükseköğretim Kurumu'nun Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı'na (ÖYP) teşekkür eder.

## Kaynaklar

- Abdel-Ghani N. T., Elsayed, H. A. ve Abdelmoied, S., (2018). Geopolymer synthesis by the alkali-activation of blastfurnace steel slag and its fire-resistance, *HBRC Journal*, 14(2), 159-164.
- Arulrajah, A., Kua, T. A., Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Shen, J. S., (2017). Compressive strength and microstructural properties of spent coffee grounds-bagasse ash based geopolymers with slag supplements, *Journal of Cleaner Production*, 162, 1491-1501.
- Ascensao, G., Seabra, M. P., Aguiar, J. B. ve Labrincha J. A., (2017). Red mud-based geopolymers with tailored alkali diffusion properties and pH buffering ability, *Journal of Cleaner Production*, 148, 23-30.
- Askarian, M., Tao, Z., Adam, G. ve Samali, B., (2018). Mechanical properties of ambient cured one-part hybrid OPC-geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 186, 330-337.
- ASTM C109 / C109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.
- ASTM C642-13, 2013. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Bai, T., Song, Z. G., Wu, Y. G., Hu, X. D. ve Bai H., (2018). Influence of steel slag on the mechanical properties and curing time of metakaolin geopolymer, *Ceramics International*, 44(13), 15706-15713.
- Davidovits, J., (1991). Geopolymers Inorganic Polymeric New Materials, *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633-1656.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S. ve Demir, İ., (2008). Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 85-94.
- Güneyli, H., Karahan, S., Güneyli, A. ve Yapıcı, N., (2017). Water Content and Temperature Effect on Ultrasonic Pulse Velocity of Concrete, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 53(2), 159-166.
- Gür, N., Aktaş, A. ve Öztekin, E., (2012). Utilization of soda ash plant solid wastes in manufacture of cement, *Elixir Cement & Con. Com.* 47, 8866-8873.
- Hajimohammadi, A., Ngo, T. ve Kashani, A., (2018). Glass waste versus sand as aggregates: The characteristics of the evolving geopolymer binders, *Journal of Cleaner Production*, 193, 593-603.
- Hassan, H. S., Abdel-Gawwad, H. A., Vasquez Garcia, S. R. ve Israde-Alcantara I., (2018). Fabrication and characterization of thermally-insulating coconut ash-based geopolymer foam, *Waste Management*, 80, 235-240.
- Karakoç, M. B., Türkmen, İ., Maraş, M. M., Kantarcı, F. ve Demirboğa, R., (2016). Sulfate resistance of ferrochrome slag based geopolymer concrete, *Ceramics International*, 42(1), 1254-1260.
- Keyte, L. M., Lukey, G. C. Ve Van Deventer, J. S. J., (2004). The effect of coal ash composition on properties of waste based geopolymers, *International Symposium Of Research Students On Material Science And Engineering*, 1-13.
- Kılıç, A. M., Kılıç, Ö. ve Keskin, M. Ö., (2010). The effect of the rock type forming the aggregate in

- lightweight polymer concrete on compressive and flexural tensile strength, *Scientific Research and Essays*, 5(15), 1986-1992.
- Kılıç, A., Teymen, A., Özdemir, O. ve Atış, C. D., (2018). Estimation of Compressive Strength of Concrete Using Physico-Mechanical Properties of Aggregate Rock, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-8, <https://doi.org/10.1007/s40996-018-0156-6>
- Kıran, (2019). Kıran geopolimer. [http://www.geocement.in/geo\\_home.php](http://www.geocement.in/geo_home.php) (Erişim tarihi: 23 Mayıs 2019).
- Latif Al-Mufti, R. ve Fried, A.N., (2012). The early age non-destructive testing of concrete made with recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 37, 379-386.
- Lucideon, (2019). MIDAR Technology. [https://www.lucideon.com/materials-technologies/midar-technology?source=AMPnewsletter\\_July18](https://www.lucideon.com/materials-technologies/midar-technology?source=AMPnewsletter_July18) (Erişim tarihi: 23 Mayıs 2019).
- Maddalena, R., Roberts, J. J. ve Hamilton, A., (2018). Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements, *Journal of Cleaner Production*, 186, 933-942.
- Matsunaga, T., Kim, J. K., Hardcastle, S., Rohatgi, P. K., (2001). Crystallinity and Selected Properties of Fly Ash Particles, *Materials science & Engineering*, 325(1-2), 333-343.
- McNulty, E., (2009). Geopolymers: An Environmental Alternative to Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement, Department of Chemistry, The Catholic University of America, *Senior Comprehensive Paper*, 22 s.
- Nikolic, V., Komljenovic, M., Dzunuzovic, N. ve Miladinovic, Z., (2018). The influence of Pb addition on the properties of fly ash-based geopolymers, *Journal of Hazardous Materials*, 350, 98-107.
- Pan Z., Tao Z., Cao Y. F., Wuhler R. ve Murphy T., (2018). Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature, *Cement and Concrete Composites*, 86, 9-18.
- Patel, Y. J. ve Shah, N., (2018). Enhancement of the properties of Ground Granulated Blast Furnace Slag based Self Compacting Geopolymer Concrete by incorporating Rice Husk Ash, *Construction and Building Materials*, 171, 654-662.
- Rangan, B. V., (2014). Geopolymer concrete for environmental protection, *The Indian Concrete Journal*, 88(4), 41-48.
- Renca, (2019). Sustainable construction materials. <http://renca.org/> (Erişim tarihi: 22 Mayıs 2019).
- Rolfe, A., Huang, Y., Haaf, M., Pita, A., Rezvani, S., Dave, A. ve Hewitt, N. J., (2018). Technical and environmental study of calcium carbonate looping versus oxy-fuel options for low CO<sub>2</sub> emission cement plants, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 75, 85-97.
- Sephaku çimento, (2018). Termik santral artık üretim akım şeması. <https://www.sephakucement.co.za/Product-Ash.php>, (Erişim tarihi: 15.10.2018).
- Shen, W., Cao, L., Li, Q., Zhang, W., Wang, G. ve Li, C., (2015). Quantifying CO<sub>2</sub> emissions from China's cement industry, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1004-1012.
- Sisol, M., Drabova, M. and Mosej, J., (2014). Alkali activation of fresh and deposited black coal fly ash with high loss on ignition, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 30(2), 103-115.
- Tekindal, M. A., Bayrak, H., Özkaya, B. ve Genç, Y., (2012). Box- Behnken Experimental Design In Factorial Experiments: The Importance Of Bread For Nutrition And Health. *Turkish Journal of Field Crops*, 17(2):115-123.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinoğlu, A., (2009). Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, 112 s.
- Vasquez, A., Cardenas, V., Robayo, R. A., Gutierrez ve R. M., (2016). Geopolymer based on concrete demolition waste, *Advanced Powder Technology*, 27(4), 1173-1179.
- Wagners, (2019). Earth friendly concrete. <https://www.wagner.com.au/main/what-we-do/earth-friendly-concrete/efc-home> (Erişim tarihi: 22 Mayıs 2019).
- Yeğinoğlu, A., (1990). Possible Uses of Soda Industry Waste as a Construction Material, *Z. Wasser-Abwasser-Forsch*, 23, 132-135.
- Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Bakri, M. M. A. ve Hussin K., (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review, *Progress in Materials Science*, 83, 595-629.
- Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K. ve Zhang, J., (2018). A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar, *Composites Part B: Engineering*, 152, 79-95.

## Production of lightweight geopolymer concrete from waste materials using Box Behnken test design

### Extended abstract

*In this study, hybrid geopolymer concrete production possibilities from industrial wastes were investigated. For this purpose, fly ashes were provided from Sugözü Thermal Power Plant and Afşin/Elbistan Thermal Power Plant. Solvay Process wastes were taken from Soda Industrial company located in Mersin province in Turkey. CEM V/A composite cement, which consists mostly of blast furnace slag and fly ash, was also used in geopolymer concrete production. Characterization of the used materials was revealed by using XRD and XRF analyses.*

*Analysis of XRD (Rigaku Miniflex) showed that Sugözü fly ash was mostly composed of mullite ( $Al_4.8Si_{1.2}O_{9.6}$ ) and quartz ( $SiO_2$ ), while Soda Sanayii residues mainly consisted of calcium carbonate ( $CaCO_3$ ). It was determined that Elbistan fly ash contained anhydrite ( $CaSO_4$ ), mullite and illite type clays. CEM V/A type cements used in the experiments consisted of calcium silicate ( $Ca_2SiO_5$ ), mainly.*

*When the XRF results are examined, it is seen that the sulfur content in the fly ash of Elbistan comes from the sulphate in the anhydrite structure. In addition, in the Soda Sanayii wastes, it is seen that the  $CaCl_2$  content and the chloride ratio is very low. The main reason for this is the additional washing process in order to reduce the chloride rate in terms of compliance with the existing regulations in Soda Sanayii production facilities in Mersin. As a result of this process, the ratio of chloride in the wastes is reduced.*

*Sodium meta silicate ( $Na_2SiO_3$ ) was used as the alkaline activator to provide geopolymerization.  $Na_2SiO_3$  solution was added to the mortar at a concentration of 5M. No extra water was used during the formation of the mortar. The effects of waste material additions on uniaxial compressive strength, hardness, unit weight, water absorption and sonic velocity properties of geopolymer concrete samples were investigated by using Box Behnken statistical test design. Quadratic models were determined as the most suitable models in the Box Behnken test design according to the test results. It has been identified that  $R^2$  value is 90.48% for 28 day uniaxial compressive strengths, 81.67% for Shore hardness,*

*94.85% for unit weight, 92.09% for water absorption and 87.74% for sonic velocity values. During the production of hybrid geopolymer concrete, uniaxial compressive strengths for 28 days varied between 7-24 MPa having unit weights of 1570-1725  $kg/m^3$ . All geopolymer concrete samples obtained were in lightweight concrete class. There was negative correlation between compressive strength and water absorption values while there were a positive correlation between compressive strength and sonic velocity/shore hardness values. There was no significant relationship between uniaxial compressive strengths and unit weight.*

*This study showed that geopolymer concretes could be produced by using the majority of industrial wastes. In addition, all geopolymer concrete samples obtained could be used in insulation and lightweight construction materials according to their strengths.*

**Keywords:** Geopolymer, Concrete, Sonic speed, Strength, Waste.



# Yüksek Fırın Cürufu İkamemesinin Çimentolu Macun Dolgunun Dayanım Özelliklerine Etkisi

**Hasan EKER\***

Gümüşhane Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane  
[eker\\_hasan@hotmail.com](mailto:eker_hasan@hotmail.com), ORCID: 0000-0003-2644-4681

**Ataç BAŞÇETİN**

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
[atac@istanbul.edu.tr](mailto:atac@istanbul.edu.tr) ORCID: 0000-0001-7533-4599

**Serkan TÜYLÜ**

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
[stuyulu@istanbul.edu.tr](mailto:stuyulu@istanbul.edu.tr) ORCID: 0000-0002-8128-9840

**Deniz ADIGÜZEL**

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
[deniza@istanbul.edu.tr](mailto:deniza@istanbul.edu.tr) ORCID: 0000-0002-1611-1296

Geliş: 30.09.2019, Revizyon: 19.12.2019, Kabul Tarihi: 31.12.2019

## Öz

Yeraltı madencilğinde atık depolama yöntemlerinden biri olan çimentolu macun dolguda (ÇMD) üretim için gerekli olan dayanımın yakalanması ve daha da geliştirilmesi bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Bu kapsamda yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmış, kısa ve uzun vadede ÇMD dayanım özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. ÇMD numuneleri önce, % 3, 5, 7, 9 ve 11 portland çimentosu ile hazırlanmış, daha sonra ise YFC ikamesi olarak çimentonun yerine ağırlıkça % 25, % 50 ve % 75'i ile karıştırılarak numuneler oluşturulmuştur. 3, 7, 14, 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine göre tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, yalnızca % 3 çimento (Ç) oranındaki % 75 YFC ikameli karışımlar macun dolgu için gerekli olan sıvılaştırma riski sınırının (0,15 MPa) altında kalmış, 28 günlük kür süresinde arakatlı kazı için istenilen dayanım sınır değeri ( $\geq 0.7$  MPa) % 7 Ç'nin % 25 YFC, % 9 Ç'nin % 25 ve % 50 YFC, % 11 Ç'nin % 25 ve %50 YFC oranlarındaki karışımlar sağlamaktadır. Ancak tahkimat amaçlı olarak YFC katkılı ÇMD kullanılmaması ya da bu konuda dayanımı geliştirebilmek için daha farklı katkı malzemelerinin de kullanılmasının gerekliliği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çimentolu macun dolgu, Yüksek fırın cürufu, Tek eksenli basınç dayanımı, Atık

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Çimentolu macun dolgu (ÇMD); % 75 - 85 pülpte katı oranındaki (PKO) tesis atığının (< 20 µm malzeme miktarı en az % 15 olan) % 3 - 11 bağlayıcı (çimento ve puzolan malzemeler) ve pompalanabilir kıvamda olması için yeterli su (proses suyu, şebeke ve göl suyu) ile karışımı olarak tanımlanmaktadır (Kesimal vd. 2003; Erçikdi vd. 2013; Yılmaz vd. 2017; Yılmaz ve Guresci, 2017; Başçetin vd. 2018a, 2018b, 2018c).

ÇMD'de çimento maliyeti çok önemlidir. Macun dolgu tesisinin en büyük finansal gideri çimento maliyetidir. Ağırlıkça % 1 oranında bağlayıcı içeren macun dolgu karışımının maliyetini 1 \$ / ton'dur (Naylor vd. 1997). Grice (1998) çalışmasında, macun dolgu işletme maliyetlerinin toplam maden işletme % 10 - 20'sini, De Souza vd. (2003) çalışmasında ağırlıkça % 3 çimento içeren macun dolgu karışımı maliyetinin, toplam macun dolgu işletme maliyetinin % 42'sini, Fall ve Benzaazoua (2003) çalışmasında ağırlıkça % 5 - 9 bağlayıcı içeren macun dolgu karışımında toplam macun dolgu işletme maliyetinin yaklaşık % 50 - 75'ini, Erçikdi vd. (2017) çalışmasında ise bağlayıcı tüketiminin, macun dolgu maliyetinin % 75'ini oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Dolgu ile ilgili maliyetlerin % 15'i bağlayıcı maliyetlerinden oluşmaktadır (Belem vd. 2000). Bu nedenle, işletmedeki istenilen dayanıma göre stabiliteyi sağlamak ve işletme maliyetlerini minimumda tutmak için bağlayıcı tipi ve dozajının optimum oranda seçilmesi çok önemlidir. Portland çimentoya (PÇ) katkı olarak; kimyasal ajanların (plastikleştiriciler, sulu sodyum silikat, sodyum hidroksit) veya puzolanik minerallerin (mermer tozu, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül, pomza vb.) kullanımı ile bağlayıcının maliyetinin azaltılabildiğini ve ÇMD'nin stabilite performansının artırılabilirliği çeşitli çalışmalarla ortaya koyulmuştur (Benzaazoua vd. 2002; 2004; Klein ve Simon, 2006; Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd. 2009; 2010a; 2010b; 2015; Fall vd. 2010; Cihangir, 2011; Cihangir vd. 2011; 2012; 2015; Yılmaz vd. 2017).

Yüksek fırın cürufu (YFC); demir imalatının metalik olmayan bir yan ürünüdür ve esas olarak silikatlardan ve kalsiyum alümino silikatlarından meydana gelmiştir. YFC yüksek fırında demir ile aynı anda erimiş, daha sonra camsı tanecikli parçacıklar oluşturmak için suya hızla daldırılarak suda soğutulan ve çimento inceliğinde veya daha ince malzemelere denir (Bouzoubaa ve Simon, 2005). Literatürde ÇMD'de YFC kullanımı ile ilgili çeşitli çalışmalar vardır (Nantel ve Lecuyer, 1983; Douglas vd. 1989; Uusitalo vd. 1993; Godbout vd. 2007).

Bunlardan bazıları şöyledir; Belem vd. (2000) çalışmasında; cüruf içeren macun dolgu karışımlarının diğer bağlayıcılarla hazırlanan karışımlara göre dayanım parametrelerinde daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmektedir. Benzaazoua vd. (2002) yapılan çalışmada; cürufun yüksek sülfat içeren atıkların kullanıldığı macun dolguda uygun olmadığını, ağırlıkça < % 32 S içeren atıkların kullanıldığı karışımlarda kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır. Ouellet vd. (2007) çalışmasında ise cüruf içeren çimento ile hazırlanan macun dolgu örneklerinin, en yüksek ince gözeneklere sahip olduğu ve yüksek tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) değerleri aldığını belirtmişlerdir. Erçikdi vd. (2009); kükürt yönünden zengin atık içeren çimentolu macun dolgu numunelerinde, endüstriyel atık ürünlerini (atık cam, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı) çimento yerine kısmi ikame etmiş ve puzolanik katkı olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Ayrıca; sulu sodyum silikat (LSS) ve sodyum hidroksit (SH) içeren alkali ile aktif hale getirilmiş nötr ve asitli yüksek fırın cürufların (AAS'ler), yüksek sülfatlı değirmen atıklarının ÇMD'si için portland çimentoya alternatif bağlayıcılar olarak kullanımını incelemiş ve dayanımı iyileştirici olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Cihangir vd. 2012).

Yılmaz vd. (2017), YFC içeren ÇMD numunelerinin, erken dönemde kontrol numunelerinin basınç dayanımı değerlerinin altında kaldığını, ilerleyen kür sürelerinde (28 - 56 gün) ise kontrol numunelerinin basınç

dayanımlarını geçtiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak; YFC'unun çimento yerine kullanılmasının macun dolgunun mekanik ve mikroyapı özelliklerinde olumlu bir gelişme ortaya koyduğu sonucuna varmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak Pirit oranı yüksek bir bakır madeninden alınan atığın kullanıldığı bu çalışmada YFC'nin etkisi ortaya konulmuştur. Bu çalışmada; ÇMD yönteminde istenilen sınır değerleri çimento miktarı azaltılarak ve çimento yerine YFC ikameli karışımlar oluşturularak sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmada farklı çimento oranları (% 3, 5, 7, 9 ve 11) ve çimento yerine ağırlıkça % 25, 50 ve 75 oranlarında da YFC ile ikame edilmiş ÇMD karışımları hazırlanarak test edilmiştir. Ayrıca yüksek fırın cürufunun (YFC) ÇMD'nin erken dayanımdan (3. gün) ve uzun kür (90. gün) süresine kadar belirli aralıklarla dayanım özelliklerinin nasıl değiştiği araştırılmıştır.

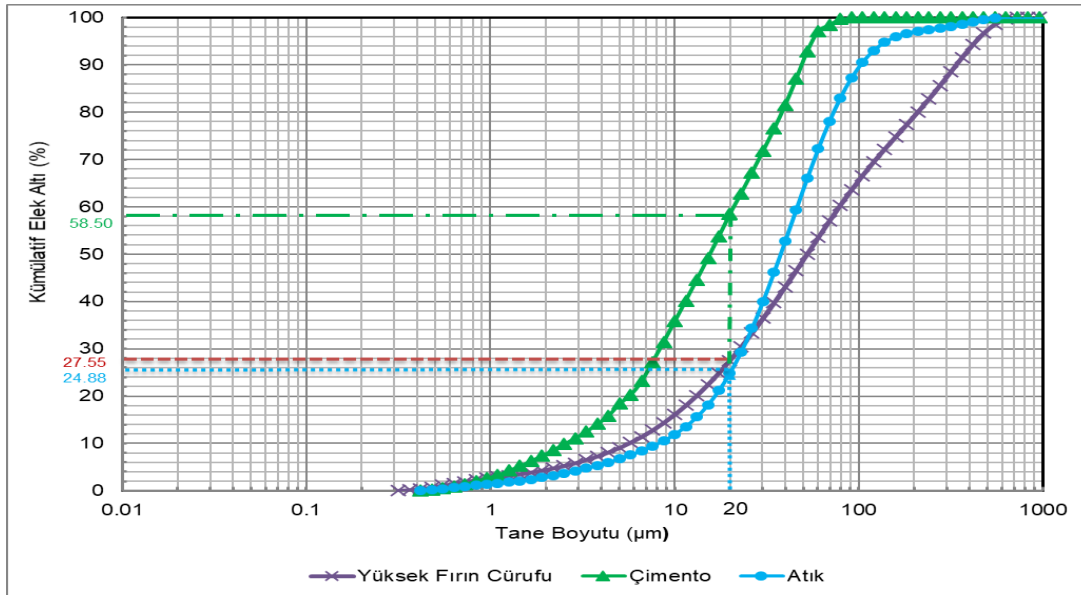
## Malzeme ve Yöntem

### Yüksek Fırın Cürufu

Bu çalışmada çimento yerine ikame olarak yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmış ve Türkiye'nin kuzeyinde yer alan Karabük ilindeki bir demir çelik fabrikasının pasa sahasından temin edilmiştir (Şekil 1). YFC; laboratuvarında önce merdaneli kırıcıdan (- 4 mm) geçirilmiş ve daha sonra bilyalı değirmen vasıtasıyla 180 dakika öğütme süresinde kuru öğütmeye tabi tutularak - 125 µm altına getirilmiştir. YFC'nun tane boyut dağılımı analizi, Malvern Mastersizer Hydro 2000 MU cihazı ile belirlenmiştir (Şekil 2). Ayrıca YFC, X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi yapılmıştır.



Şekil 1. Yüksek fırın cürufu.



Şekil 2. Atık, bağlayıcı ve YFC tane boyut dağılımları.

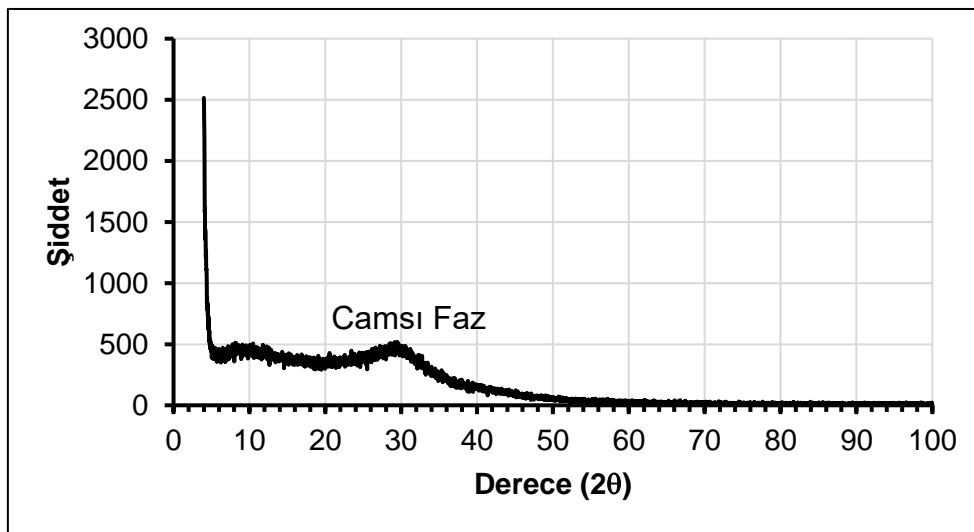


YFC'nin 20 µm altı tane boyutu % 27,55'tir (Şekil 2). Spesifik yüzey alanı ise 4428 cm<sup>2</sup>/g'dır. Ayrıca YFC ayrıntılı kimyasal.

fiziksel ve minerolojik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. YFC ait XRD kırınım desenine göre numune amorf - camsı faz özelliği göstermektedir (Şekil 3).

**Tablo 1.** Kullanılan bakır atık, çimento ve yüksek fırın cürufu kimyasal ve fiziksel özellikleri (Eker, 2019).

Özellikler	Atık (%)	CEM I 42.5 R (%)	Yüksek Fırın Cürufu (%)
<b>Kimyasal Bileşim</b>			
SiO <sub>2</sub>	12.26	19.13	41.59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.08	4.71	11.17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	54.28	3.28	0.84
MgO	2.33	1.29	7.11
SO <sub>3</sub>	-	3.49	0.15
CaO	1.76	64.07	34.64
Na <sub>2</sub> O	0.03	0.25	0.25
K <sub>2</sub> O	0.09	0.86	0.71
Serbest CaO	-	1.65	-
Kızdırma Kaybı	24	2.09	1.00
<b>Fiziksel Özellikler</b>			
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3.61	3.14	2.99
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	1801	3640	4428
<b>Minerolojik Özellikler</b>			
Kalsit	CaCO <sub>3</sub>	Atık	
Jips	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Kamosit	(Fe <sup>2+</sup> ,Mg,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>5</sub> Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,O) <sub>8</sub>
Manyetit	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Hematit	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Kuvars	SiO <sub>2</sub>	Pirit	FeS <sub>2</sub>
		Siderit	Fe <sup>2+</sup> CO <sub>3</sub>

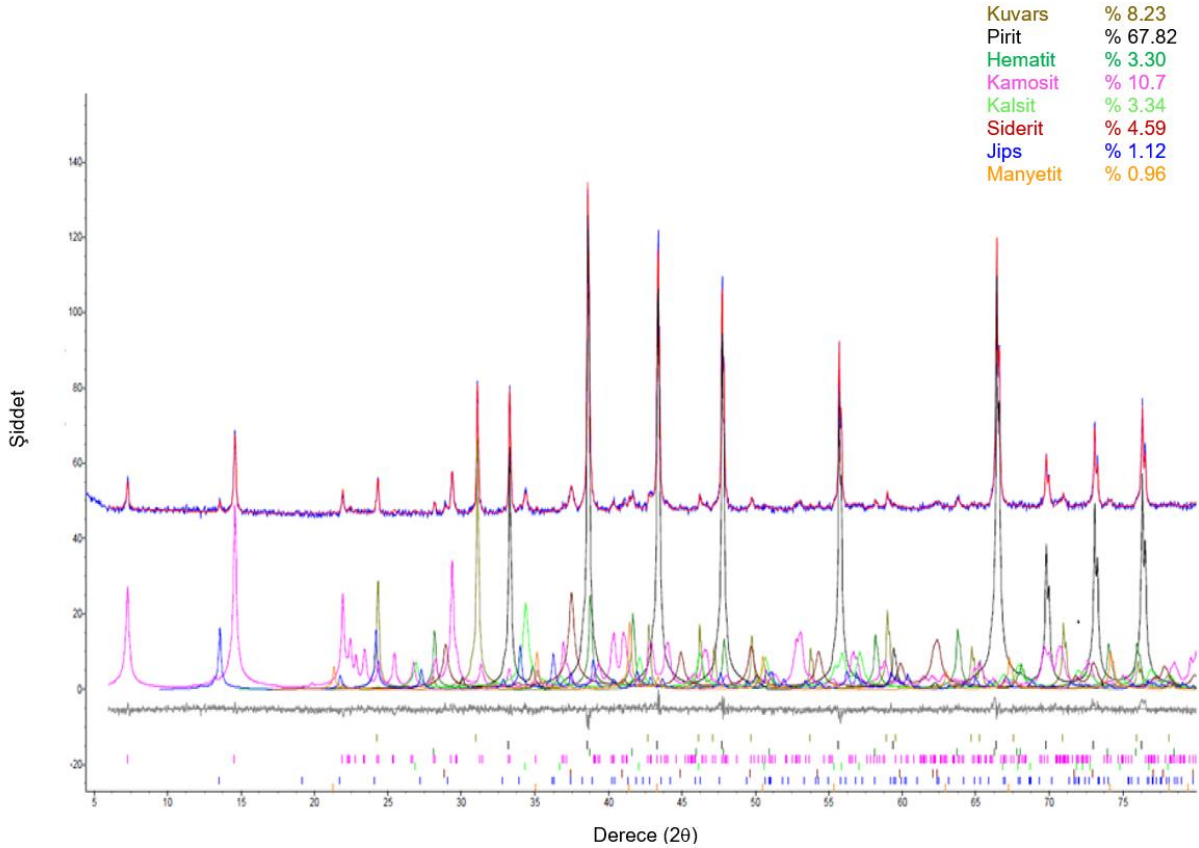


**Şekil 3.** Yüksek fırın cürufu XRD kırınım deseni.

### Atık ve Bağlayıcı

Atık malzeme; Küre’de yer alan bir bakır madeninden temin edilmiştir. 20 µm altı tane boyut değeri % 24.88’dir (Şekil 2). Ayrıntılı kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Mineralojik analiz içeriğinde görüldüğü üzere atığın pirit içeriği

% 67.82 olarak bulunmuştur. Ayrıca % 3.3 kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ), % 8.2 kuvars ( $\text{SiO}_2$ ) % 10.7 kamosit (Demir Silikat,  $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{O})_8$ ), % 1.1 jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), %3.3 hematit ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), % 1.0 manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ve % 4.6 siderit ( $\text{Fe}^{2+}\text{CO}_3$ ) minerallerinin atığın içerisinde de yer aldıkları belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Atık mineralojik kompozisyonu.

Macun dolgu tesislerinin çimento maliyetlerini azaltmak için çimento yerine ikame edilen mineral katkı maddesinin macun dolgu karışımlarındaki etkisini görmek için normal Portland çimentosu tercih edilmiştir. Kullanılan çimentonun kimyasal analiz sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Ayrıca karışımlarda şebeke suyu kullanılmıştır.

### Çimentolu Macun Dolgu Numunelerinin Hazırlanması ve TEBD deneyi

Çimentolu macun dolgu (ÇMD) numuneleri; bakır atığı, çimento, yüksek fırın cürufu (YFC) ve şebeke suyunun homojen olarak karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. İlk önce atığın, ağırlıkça % 3-5-7-9-11 oranlarında

çimento ve şebeke suyu ile karıştırılmasıyla referans numuneleri ve daha sonra kullanılan çimento miktarlarının (% 3 – 5 – 7 - 9 - 11) her biri için % 25, % 50 ve % 75 oranlarında YFC ikamesi içeren çimentolu macun dolgu numuneleri oluşturulmuştur. Macun dolgunun homojen bir karışım oluşturması için mikser vasıtasıyla 10 dk karıştırılmıştır. Hazırlanan macun dolgu karışımları 18 cm çökme (slump) ve % 81 katı oranı değerine göre hazırlanmıştır. ÇMD uygulamalarında, slump değeri 15.24-25.4 cm arasındadır ve en çok tercih edilen slump değeri 18 cm olması nedeniyle bu değer kullanılmıştır (Fall vd. 2009).

Macun dolgu karışımları 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki drenajlı (alt kısmında 4 adet delik bulunan) silindirik numune kalıplarına dökülmüş ve en az % 80 nem oranında ve 25 ° C sıcaklığa ayarlanan kür kabiniinde belirlenen kür sürelerinde (3, 7, 14, 28, 56 ve 90 gün) bekletilmiştir.

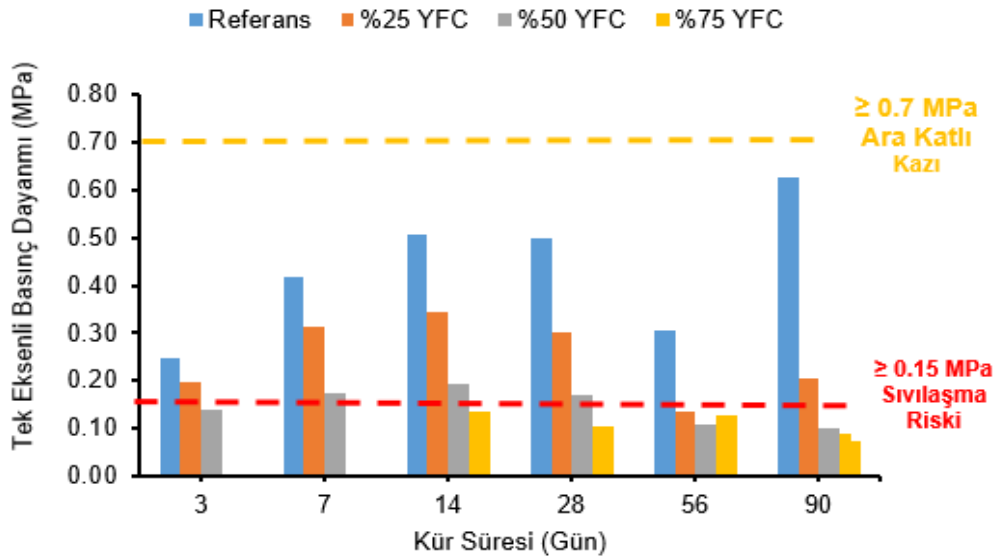
Macun dolgunun; TEBD deneyi 50×100 mm boyutlarında hazırlanan silindirik numuneler üzerinde ASTM C 39 standardına uygun olarak yapılmıştır.

Belirlenen kür sürelerine ulaşan % 3 - 5 - 7 - 9 - 11 çimento oranları ve YFC ağırlıkça % 25, % 50 ve % 75 oranlarında çimento yerine kullanılmasıyla elde edilen numuneler 50 kN yükleme kapasitesine sahip 1 mm/dk sabit yükleme hızında otomatik kontrollü preste kırılarak dayanım değerleri 3, 7, 14, 28, 56 ve 90 gün günlük kür süreleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Silindirik macun dolgu numunelerinin boy/çap oranı en az 2 olup, numunelerin alt ve üst yüzeyleri deney öncesi düzeltilmiştir. Her bir kür süresi için 3 adet

numune deneyde test edilmiş olup, elde edilen değerlerin ortalaması sonuç olarak alınmıştır. Macun dolgu karışımlarının kalitesini tespit etmek için sıvılaşma riski sınır değeri olarak 0.15 MPa (Been vd. 2002; Roux vd. 2004), ara katlı kazı için  $\geq 0.7$  MPa (Brackebusch 1994; Landriault 1995) ve Grice (1998) çalışmasında belirttiği tavan tahkimatı olarak  $\geq 4$  MPa değerleri belirlenmiştir.

## BULGULAR

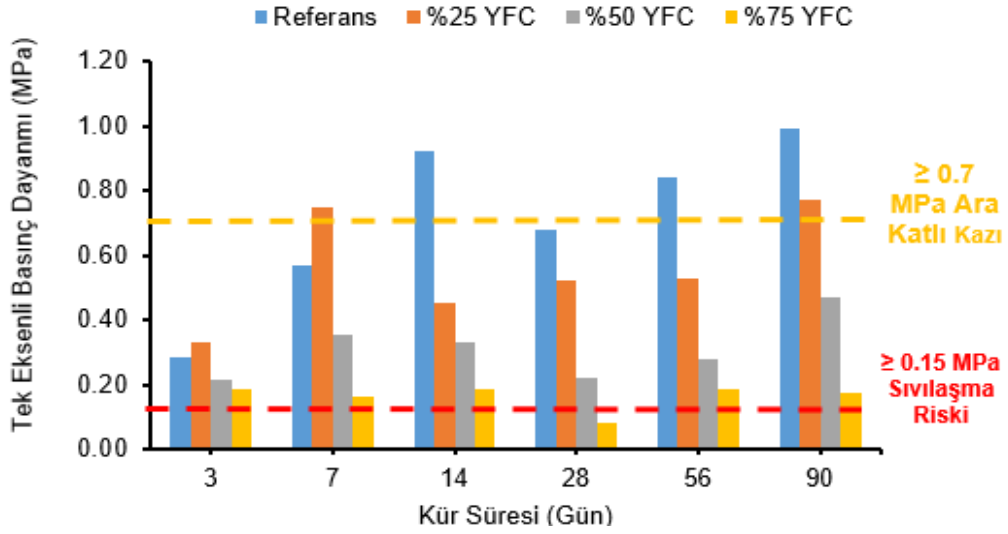
% 3, % 5, % 7, % 9 ve % 11 oranlarında (ağırlıkça) CEM I 42,5 R çimento ve çimento yerine ikame olarak yüksek fırın cürufu (YFC), çimento oranının % 25, % 50 ve % 75 oranlarında birlikte kullanılmasıyla sabit kıvamda (18 cm/7.09 inç) macun dolgu numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 25 ° C ve en az % 80 nem içeren koşullarda kür kabiniinde bekletilmiş ve günü gelen kür süreleri sonunda elde edilen tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) sonuçları Şekil 5 - 9'da gösterilmiştir.



Şekil 5. % 3 çimentolu ve YFC ikameli macun dolgu numunelerinin TEBD sonuçları.

% 3 çimento içeren macun dolgu karışımına farklı oranlarda YFC eklenmesi basınç dayanımını artırmamıştır. Ayrıca 28 günlük kür süresinde istenilen  $\geq 0.7$  MPa dayanım sınır değerini aşan karışım oranı da

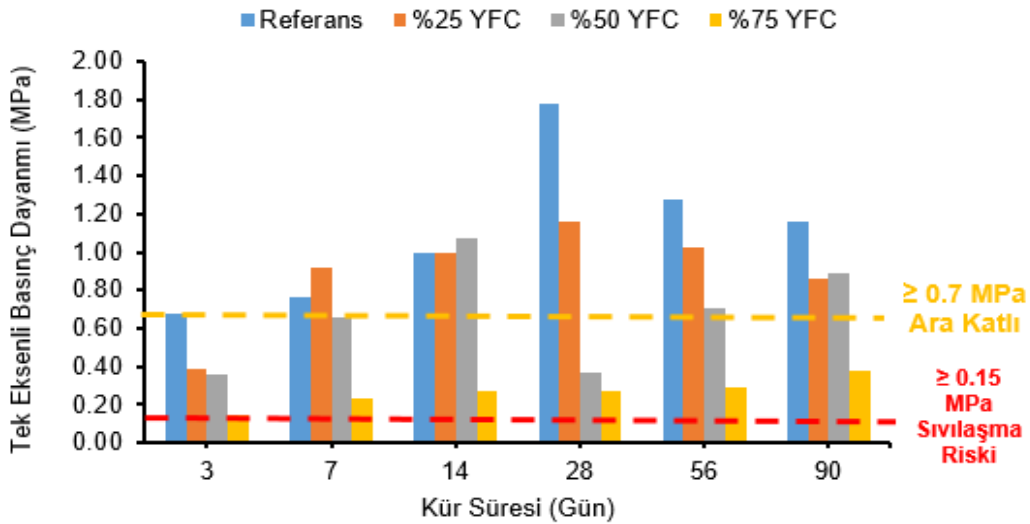
bulunmamaktadır. Sıvılaşma riski sınırı olan  $\geq 0.15$  MPa değerini % 25 ve % 50 karışım oranlarında aşıldığı görülmektedir. Bu karışım oranlarının TEBD sonuçları sırasıyla 0.30 ve 0.17 MPa'dır (Şekil 5).



**Şekil 6.** % 5 çimentolu ve YFC ikameli macun dolgu numunelerinin TEBD sonuçları.

Şekil 6'da görüldüğü üzere % 5 çimento içeren macun dolgu karışımında YFC eklenmesi basınç dayanımını artırmış. Ama referans numunenin dayanımını geçememiştir. 3. ve 7. kür süresinde referansa (0.28 ve 0.57 MPa) göre % 25 (0.33 ve 0.75 MPa) ve % 50 (0.21 ve 0.35 MPa) oranlarında YFC içeren numuneler daha fazla dayanım kazanmıştır. 28 günlük kür süresinde istenilen

$\geq 0.7$  MPa dayanım sınır değerini ise geçen karışım bulunmamaktadır. Tavan tahkimatı olarak istenilen  $\geq 4$  MPa sınır değerini geçen karışım oranı bulunmamaktadır. Ayrıca sıvılaşma riski sınırı olan  $\geq 0.15$  MPa değerini % 25 ve % 50 karışım oranlarında sağlanmaktadır. Bu karışım oranlarının TEBD sonuçları sırasıyla 0.52 MPa ve 0.22 MPa'dır.

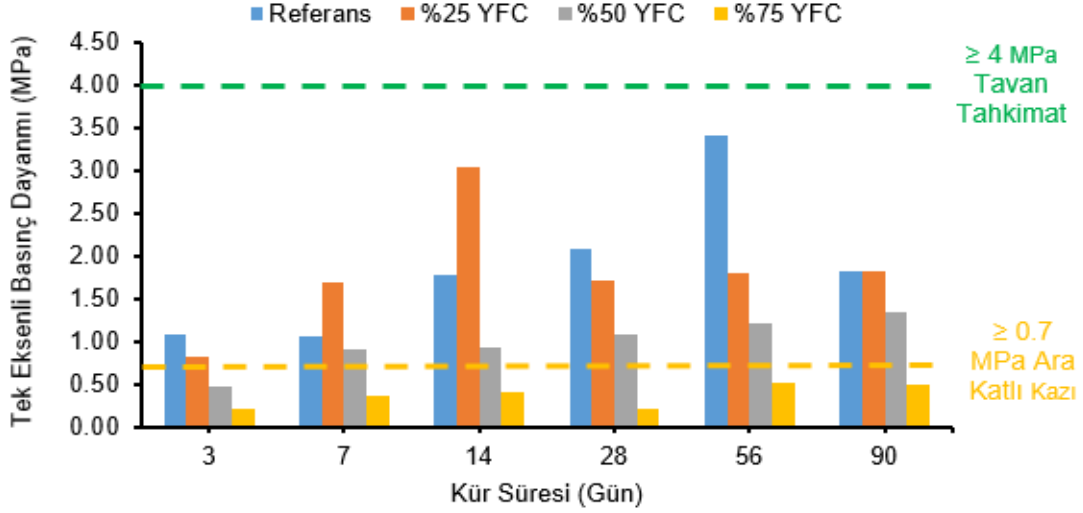


**Şekil 7.** % 7 çimentolu ve YFC ikameli macun dolgu numunelerinin TEBD sonuçları.

Şekil 7'de % 7 çimento içeren macun dolgu karışımında YFC eklenmesi basınç dayanımını artırmıştır. Ama referans numunenin dayanımını geçememiştir. 28

günlük kür süresinde istenilen  $\geq 0.7$  MPa dayanım sınır değerini % 25 karışım oranında 1.16 MPa değer olarak geçmiştir. Tavan tahkimatı olarak istenilen  $\geq 4$  MPa sınır

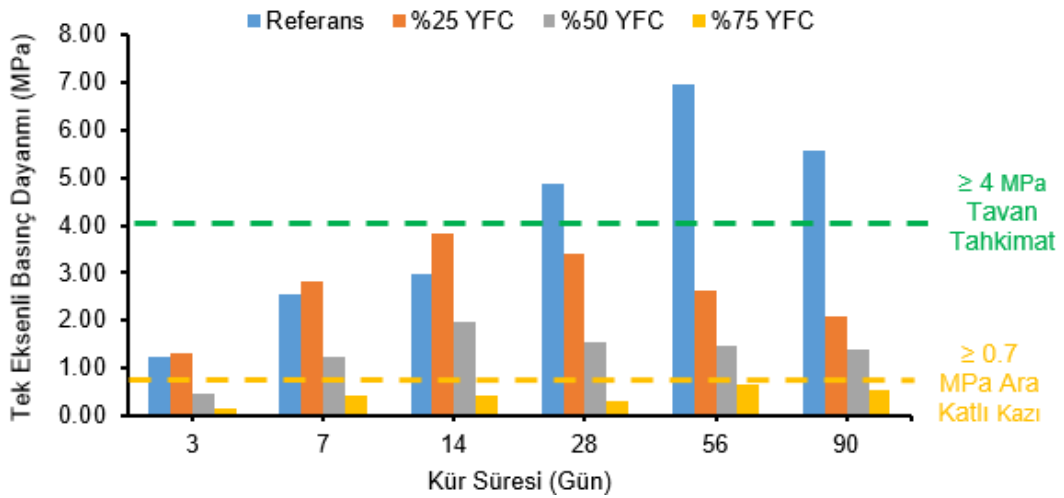
değerini geçen karışım oranı ve 75 karışım oranlarının TEBD sonuçları bulunmamaktadır. Ayrıca sıvılaşma riski sınırı olan  $\geq 0.15$  MPa değerini bütün karışım oranlarında sağlanmaktadır. % 7 Ç - % 25, 50



**Şekil 8.** % 9 çimentolu ve YFC ikameli macun dolgu numunelerinin TEBD sonuçları.

Şekil 8’de görüldüğü üzere % 9 çimento içeren macun dolgu karışımında YFC eklenmesi basınç dayanımını artırmıştır. Ama referans numunenin dayanımını geçememiştir. 7. ve 14. kür süresinde referansa (1.05 ve 1.77 MPa) göre % 25 (1.70 ve 3.03 MPa) oranında YFC içeren numuneler daha fazla dayanım kazanmıştır. Sıvılaşma riski sınırı olan  $\geq 0.15$  MPa değerini bütün

karışım oranlarında (1.72, 1.07 ve 0.21 MPa) sağlanmaktadır. 28 günlük kür süresinde istenilen  $\geq 0.7$  MPa dayanım sınır değerini % 25 ve % 50 karışım oranlarında sağlanmaktadır. Bu karışım oranlarının TEBD sonuçları sırasıyla 1.72 MPa ve 1.07 MPa’dır. Ayrıca tavan tahkimatı olarak istenilen  $\geq 4$  MPa sınır değerini geçen karışım oranı bulunmamaktadır.



**Şekil 9.** % 11 çimentolu ve YFC ikameli macun dolgu numunelerinin TEBD sonuçları.

Şekil 9'da görüldüğü üzere % 11 çimento içeren macun dolgu karışımında YFC eklenmesi basınç dayanımını artırmıştır. Ama referans numunenin dayanımını geçememiştir. 7. ve 14. kür süresinde referansa (2.54 ve 2.97 MPa) göre % 25 oranında YFC içeren numuneler (2.83 ve 3.81 MPa) daha fazla dayanım kazanmıştır. Sıvılaştırma riski sınırı olan  $\geq 0.15$  MPa değerini bütün karışım oranlarında sağlamaktadır. 28

## Tartışma

% 25, 50 ve 75 oranlarında ikame edilen YFC; % 5, 7, 9 ve 11 çimento oranlarındaki karışımlarda Belem vd. (2000), Benzaazoua vd. (2002), Ouellet vd. (2007); Erçikdi vd. (2009), Cihangir vd. (2012), Yılmaz vd. (2017) çalışmalarında olduğu gibi macun dolgu karışımlarının basınç dayanımını artırmıştır. Bu çalışmalarda macun dolgu karışımlarının aldığı TEBD değerleri sırasıyla; 0,41 – 2,3 MPa, 0 – 4 MPa, 0,8 - 1,8 MPa, 0,07 – 0,8 MPa, 1,54 – 4.74 MPa, 0,5 – 1,4 MPa'dır.

28 günlük kür süresinde istenilen dayanım sınır değerini % 7 çimento - % 25 YFC, % 9 çimento - % 25 ve 50 YFC, % 11 çimento - % 25 - 50 YFC oranlarındaki karışımlarda sağlamaktadır. Ayrıca tavan tahkimatı olarak kullanılması için gerekli olan sınır değerini ( $\geq 4$  MPa) sadece % 11 çimento - % 25 YFC ikameli karışım sağlamaktadır. Yılmaz vd. (2017) çalışmasında ilerleyen kür sürelerinde (28 -56 gün) YFC'unun etkili olduğunu belirtse de bu çalışmada olduğu gibi YFC ikamesinin erken dayanımda da (28. güne kadar) etkili olduğu ve referans numune dayanımlarını bu dönemde geçtiği görülmektedir. Ayrıca Benzaazoua vd. (2002) yapılan çalışmasında; cürufun yüksek sülfat içeren atıkların kullanıldığı macun dolgu karışımları için uygun olmadığını belirttiği çalışmasının aksine  $> \% 32$  S (kükürt içeren) atıkların kullandığı karışımlarda da kullanılabildiği ortaya konulmuştur. Dayanım da meydana gelen düşüşlerin YFC tane boyutunun kullanılan atık gibi iri boyutlu olması nedeniyle macun dolgu karışımı

günlük kür süresinde istenilen  $\geq 0.7$  MPa dayanım sınır değerini % 25 ve % 50 karışım oranlarında geçilmiştir. Bu karışım oranlarının TEBD sonuçları sırasıyla 3.41 MPa ve 1.56 MPa'dır. Ayrıca tavan tahkimatı olarak kullanılması için gerekli olan sınır değerini ( $\geq 4$  MPa) geçen karışım oranı bulunmamaktadır.

bünyesinde çimento ile boşluklu yapı oluşturulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

## Sonuçlar

Bu çalışmada % 3, 5, 7, 9 ve 11 portland çimentosu ile hazırlanmış ÇMD numuneleri ve çimento yerine ağırlıkça % 25, % 50 ve % 75 oranlarında YFC ile ikame edilmiş ÇMD karışımlar incelenmiştir.

Deney sonuçlarına göre, yalnızca % 3 çimento (Ç) oranındaki %75 YFC ikameli karışımlar macun dolgu için gerekli olan sıvılaştırma riski sınırının (0,15 MPa) altında kalmış, 28 günlük kür süresinde istenilen dayanım sınır değeri ( $\geq 0.7$  MPa) % 7 Ç'nin % 25 YFC, % 9 Ç'nin % 25 ve % 50 YFC, % 11 Ç'nun % 25 ve % 50 YFC oranlarındaki karışımlar sağlamaktadır.

YFC; çimento yerine ikame edilen çimentolu macun dolgu karışımlarında basınç dayanımını iyileştirmiştir. % 5 ve üzeri çimento içeren macun dolgu karışımlarına ikame edilen YFC, en iyi basınç dayanımı sonuçlarını % 25 ve % 50 YFC katkılı karışımlarda vermiştir. Genel olarak YFC ikamesinin erken dayanımda (28. güne kadar) daha etkili olduğu ve referans numune dayanımlarını bu dönemde geçtiği görülmektedir.

Uzun vadedeki mekanik dayanım düşüşlerini ortadan kaldırmak için öğütme süresini artırarak YFC tane boyutunun düşürülebilir ve iri boyutlu atık ile daha iyi bir karışım oluşturulması sağlanarak yeniden bu karışım oranlarında denemeler yapılabilir.

## Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Tarafından Desteklenmiştir. Proje numarası: FDK-2018-24707.

## Kaynaklar

- ASTM C39 / C39M-18, (2018). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- Başçetin, A, Eker, H, Tuylu, S, D, Adıgüzel, (2018a). Effect of substitution of Zeolite on the mechanical properties of Cemented Paste Backfill, Proceedings of the 4 th International Underground excavations symposium, 13-14 September 2018, Istanbul, p 575-581.
- Başçetin, A, Eker, H, Tüylü, S, Adıgüzel, D. (2018b). Determination of strength properties of copper mine tailings, ROCKMEC'2018-12th Regional Rock Mechanics Symposium, 3-5 October 2018, Trabzon, Turkey, s. 162-167, 2018.
- Başçetin, A, Eker, H, Tüylü, S, Adıgüzel, D, Odabas, E. (2018c). Effect of fly ash on the mechanical strength of cemented paste backfill, Cappadocia Earth Sciences Symposium, 24-26 October 2018, Niğde, Turkey.
- Been, K., Brown, E., T., ve Hepworth, N., (2002). Liquefaction potential of paste fill at Neves Corvo mine, Portugal, Mining Technology, 111:1, 47 - 58, DOI: 10.1179/mnt.2002.111.1.47.
- Belem, T., Benzaazoua, B., Bussière, B., (2000) Mechanical behaviour of cemented paste backfill. In: Proceedings of 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal, Quebec, pp. 373 - 380.
- Benzaazoua, M., Belem, T., ve Bussiere, B., (2002) Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill, Cement and Concrete Research, 32(7), 1133 - 1144.
- Benzaazoua, M., Fall, M., ve Belem, T. (2004). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill, Minerals Engineering, 17(2), 141 - 152.
- Bouzoubaa, N., Simon, F.S., (2005). Use of fly ash and slag in concrete: a best practice guide. materials technology laboratory (MTL), Public Works and Government Services, Government of Canada, 2004 - 16.
- Brackebusch, F., W., 1994, (*Basics of paste backfill systems*). Miner Eng 46(10), p. 1175 – 1178.
- Cihangir, F., 2011, Investigation of utilisation of alkali activated blast furnace slag as binder in paste backfill, Ph. D. Thesis, Karadeniz Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Trabzon, Turkey, 207p.
- Cihangir, F., Ercikdi, B., Turan, A., Kesimal, A., Deveci, H., Yazıcı, M., Karaoğlu, K., (2011) Utilisation of sodium silicate activated blast furnace slag as an alternative binder in paste backfill of high-sulphide mill tailings, In: Proceedings of the 14th international seminar on paste and thickened tailings, Perth, Australia, p 465 – 475.
- Cihangir, F, Ercikdi, B, Kesimal, A, Alp, T, Deveci, H, (2012). Utilisation of alkali-activated blast furnace slag in paste backfill of high-sulphide mill tailings: Effect of binder type and dosage, Minerals Engineering 30 (2012) 33–43.
- Cihangir, F., Erçikdi, B., Kesimal, A., Deveci, H., Erdemir, F., (2015). Paste backfill of high-sulphide mill tailings using alkaliactivated blast furnace slag: effect of activator nature, concentration and slag properties, Minerals Engineering, vol. 83, pp.117 - 127, 2015.
- De Souza E., Archibald JF, Dirige APE, (2003). Economics and perspectives of underground backfill practices in Canadian mining. In: 105th annual general meeting of the Canadian institute of mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, Canada, 15p.
- Douglas, E. Malhotra V. M. (1989). Ground granulated blast-furnace slag for cemented mine back II: Production and evaluation, CIM Bull. 82, 929 (1989) 27-36.
- Eker, H. (2019) Metalik proses artıklarının macun dolgu yöntemi ile depolanmasında uygun tasarım parametrelerinin belirlenmesi, İstanbul

- Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 252 s. İstanbul.
- Erçikdi, B. (2009). Mineral ve kimyasal katkı maddelerinin macun dolgu performansına etkisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Haziran 2009, Trabzon.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., ve Alp, I., (2009a). Utilization of industrial waste products as pozzolanic material in cemented paste backfill of high sulphide mill tailings, *Journal of Hazardous Materials*, 168, 848–856.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., ve Alp, I., (2010a) Effect of natural pozzolans as mineral admixture on the performance of cemented-paste backfill of sulphide-rich tailings, *Waste Management and Research*, 28, 430–435.
- Erçikdi, B. Cihangir, F. Kesimal, A. Deveci, H. Alp, İ. (2010b) Utilization of water-reducing admixtures in cemented paste backfill of sulphide-rich mill tailings, *Journal of Hazardous Materials* 179 (2010) 940–946.
- Erçikdi, B, Baki H, İzki M (2013). Effect of desliming of sulphide-rich mill tailings on the long-term strength of cemented paste backfill, *J Environ Manage* 115:5–13
- Erçikdi, B. Külekci, G. Yılmaz, T. (2015). Utilization of granulated marble wastes and waste bricks as mineral admixture in cemented paste backfill of sulphide-rich tailings, *Construction and Building Materials* 93 (2015) 573–583.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., (2017). Practical importance of tailings for cemented paste backfill, in: *Paste Tailings Management*, Yılmaz E., Mamadou F., Eds., Springer, London/Berlin/Switzerland, Cham, s.7-12, 2017
- Fall, M, Benzaazoua, M, (2003). Advances in predicting performance properties and cost of paste backfill, In: *Proceedings on tailings and mine waste'03*, Vail, USA, p 73–85.
- Fall, M., Adrien, D., Celestin, J. C., Pokharel, M., Touré, M., (2009). Saturated hydraulic conductivity of cemented paste backfill, *J Miner Eng* 2009;22(15):1307–17.
- Fall, M. Célestin, J.C. Pokharel, M. Touré, M. (2010). A contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill, *Engineering Geology* 114 (2010), s. 397–413.
- Grice, T., (1998). Underground mining with backfill. In: *The second annual summit on mine tailings disposal systems*, Brisbane, Australia, p 5–15
- Godbout, J., Bussière, B., Aubertin, M., Belem, T., (2007). Evolution of cemented past backfill saturated hydraulic conductivity at early curing time, In: *Diamond Jubilee Canadian Geotechnical Conference and the 8th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference*, Ottawa, Ontario, 21 - 24 October. Canadian Geotechnical Society, Alliston, Ontario.
- Kesimal A, Ercikdi B, Yılmaz E (2003). The effect of desliming by sedimentation on paste backfill performance, *Miner Eng* 16(10):1009–1011.
- Klein, K. Simon, D. (2006). Effect of specimen composition on the strength development in cemented paste backfill, *Can. Geotech. J.* 43: 310–324 (2006) doi:10.1139/T06-005.
- Landriault, D., (1995). Paste backfill mix design for Canadian underground hard rock mining, In: *Proceedings of the 97th annual general meeting of the CIM rock mechanics and strata control session*, Nova Scotia, Canada, p 652–663.
- Nantel, J., Lecuyer, N., (1983). Assessment of slag backfill properties for the Noranda Chadbourne Project, *CIM Bull.* 849, 57 - 60.
- Naylor, J, Farmery, R, A, Tenbergen, R, A, (1997). Paste backfill at the Macassa mine with flash paste production in a paste production and storage mechanism, In: *Proceedings of the 29th annual meeting of the Canadian mineral processors*, Canada, p 408–420.
- Ouellet, S., Bussière, B., Aubertin, M., Benzaazoua, M., (2007). Microstructural evolution of cemented paste backfill: mercury intrusion porosimetry test results, *Cem. Concr. Res.* 37, 1654-1665.
- Roux, L., K, Bawden W., F., Grabinsky M., W., (2004). Liquefaction analysis of early age cemented paste backfill. In: *8th international*



- symposia on mining with backfill, Beijing, China, p 233–241.
- Tariq A, Nehdi, M, (2007). Developing durable paste backfill from sulphidic tailings, Waste Res Manage, 160(4):155–166
- Uusitalo, R., Seppanen, P., Nieminin, P., (1993). *The use of blast furnace slag as a binder*, In: Symposium Presented at the Fifth International Symposium on Mining with Backfill, pp. 169-172. Johannesburg, South Africa.
- Yılmaz, T. Erçıkdi, B. Cihangir, F. (2017). Yüksek fırın cürufu ve perlit ikamesinin çimentolu macun dolgunun mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(2), ss. 239-251, Haziran 2017.
- Yılmaz, E, Guresci, M, (2017). Design and characterization of underground paste backfill, in: Paste Tailings Management, Yılmaz, E, Mamadou, F, Eds., Springer, London/Berlin/Switzerland , Cham, pp,111-144.

## Effect of Substitution of Blast Furnace Slag on Strength Properties of Cemented Paste Backfill

### Extended abstract

*The aim of this study is to capture and improve the strength required for production in cemented paste backfill (CPB), which is one of the tailings storage methods in underground mining. In this context, blast furnace slag (BFS) was used and its effect on the strength properties of CPB in the short and long term was investigated.*

*CPB; 75 % to 85 % pulp solids (PKO) of 3-11 % binder (cement and pozzolane materials) and sufficient water to be pumpable (process water, tap and lake water) It is defined as a mixture with.*

*CPB samples were first prepared with 3, 5, 7, 9 and 11 % portland cement and then mixed with 25 %, 50 % and 75 % by weight instead of cement as BFS substitute. Uniaxial compressive strength (UCS) test was performed according to curing times of 3, 7, 14, 28, 56 and 90 days.*

*25, 50 and 75% substituted YFC; 5, 7, 9 and 11% as in the work of the mixture of cement paste backfill mixture has increased compressive strength (Belem et. al 2000, Benzaazoua et. al 2002, Ouellet et. al 2007; Ercikdi et. al 2009; Cihangir et. al 2012; Yilmaz et. al 2017). In these studies, TEBD values of paste backfill mixtures were as follows; 0.41 to 2.3 MPa, 0 to 4 MPa, 0.8 to 1.8 MPa, 0.07 to 0.8 MPa, 1.54 to 4.74 MPa, 0.5 to 1.4 MPa.*

*Yilmaz et al. (2017) reported that YFC was effective in curing times (28-56 days), but YFC substitution was also effective in early strength (up to 28 days) and it exceeded the reference sample strength in this period. Also, Benzaazoua et al. (2002) in the study; contrary to the study where slag is not suitable for paste backfill mixtures using high sulphate containing wastes, it has been shown that it can also be used in mixtures using > 32% S (sulfur containing) wastes. The decreases in strength are thought to be due to the fact that the YFC grain size is coarse-sized like the waste used, resulting in the formation of hollow structure with cement in the putty filling mixture.*

*According to the test results, only 3 % cement (C) ratio of 75 % BFS substitutes were below the liquefaction risk limit (0.15 MPa) required for using paste backfill. The required strength limit value ( $\geq 0.7$  MPa) for sublevel excavation during the 28-day curing period is mixtures of 7 % - 25 % BFS, 9 % - 25 % and 50 % BFS, 11 % - 25% and 50 % BFS. However, it has been determined that there should be no use of BFS -added CPB for fortification purposes or that different additives should be used in order to improve the strength in this regard.*

**Keywords:** *Cemented paste backfill, Blast furnace slag, Uniaxial compressive strength, Tailings*

## Ulusal, Bölgesel ve Uluslararası Bazda Yüksek Hızlı Demiryollarının Gelişimi, Mevcut Durumu ve Yatırım Planlarına Dair Bir Derleme

### Comparative Evaluation Of Development, Existing Case and Investment Plans on High Speed Railways in National, Regional and International Scale

Mehmet Fatih Altan<sup>1\*</sup>, Mehmet Çağrı Kızıltaş<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, mehmetaltan@aydin.edu.tr

<sup>2</sup>İstanbul Ticaret Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, mckiziltas@ticaret.edu.tr

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*

Geliş: 4 Ağustos 2018  
Düzeltilme: 22 Aralık 2018  
Kabul: 13 Şubat 2019

*Anahtar kelimeler:*

Altyapı, işletme, türel dağılım, karşılaştırmalı değerlendirme, yüksek hızlı demiryolları

#### ÖZET

Günümüzde kimi çalışmalarda demiryolu sistemi üzerine yoğunlaşmak yerine otomobil ve havayolu ulaştırma türlerinin geliştirilmesi ile ilgilenilmektedir. Fakat kullanıcı davranışları ele alındığında bir yolculuk tercihinde sadece teknik imkânlar değil aynı zamanda sosyal eğilimlerinin de etkili olduğu görülecektir. Eğer sosyal dinamiklerin demiryolu ulaştırmasının gelişimine adaptasyonu söz konusu olursa yüksek hızlı demiryolları modern ulaştırma sisteminde öncül bir konuma gelebilir. Bu yönde çalışmalara odaklanılması için fazlası ile gerekçe bulunmaktadır. Çelik tekerlekli demiryolları etkili ve doğrudan bir hizmet sunmaktadır. Yüksek hızlı demiryollarının getirdiği teknik kolaylıklar dünya çapında tanınmış ve onaylanmış durumdadır. Bunun yanı sıra önemli bir kısmı yüksek hızlı demiryollarına entegre edilebilecek olan çok ciddi miktardaki bir konvansiyonel demiryolu hattı da halihazırda bulunmaktadır. Demiryolu ulaştırması aynı zamanda enerji etkin ve çevre dostudur. Yüksek hızlı demiryolları araç, altyapı ve tren gibi unsurlar bakımından kayda değer bir gelişim kat etmiş olduğundan günümüzde daha çok ağır stratejik gelişimi ve hizmet parametreleri gibi unsurlara eğilinmektedir. Bu çalışma kapsamında yüksek hızlı demiryollarının yatırım maliyetleri değerlendirilmiştir. Bu bağlamda Japonya ana örnek olarak ele alındıktan sonra Birleşik Krallık ve Almanya'da bu sistemdeki mevcut durum detaylı olarak incelenmiş ve çeşitli karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu bağlamda küresel derlemeler dâhilinde sonuçlar ortaya konmuştur.

Doi: 10.24012/dumf.450985

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 4 August 2018  
Revised: 22 December 2018  
Accepted: 13 February 2019

*Keywords:*

Operation, modal distribution, high speed railways

#### ABSTRACT

Transport, from the existence of mankind to today; the causes and consequences of social relations and technical developments constitute one of the main elements of an integrated system. It is therefore at the center of all social, economic, technical, cultural and political processes as a driving force. Transportation, which is inextricably linked to urbanization and has a reciprocal relationship, will only be able to provide 'inputs and outputs' in a coherent and integrated systematic approach. One of the most important dilemmas of our country for many decades has been the fact that every arena approach and non-integrative actions and thoughts are taking place. From this point of view, our basic need for an integrated approach is in many respects, especially in academy, market, urbanization and transportation, theory and practice. We live in similar issues, such as 'integration between modes, human-focused approach, balanced distribution, upgrading of service parameters' which are the main subjects of transportation. On this context firstly the general concept of HSR is evaluated, then Germany and United Kingdom system samples are revealed for a focused discussion. After these, a detailed comparison has done by means of USA and EU transportation data. Lastly investment costs are analysed generally. As a result conclusions and recommendations are given on a continental scale.

\* Sorumlu yazar / Correspondence  
Mehmet Fatih ALTAN  
✉ mehmetaltan@aydin.edu.tr



Zira Ankara-Yozgat-Sivas YHD hattının 2020 yılı itibari ile açılması beklenebilir. Ankara-Afyon-Manisa-İzmir YHD hattının inşası da hızla devam etmekte olup hattın yarısı tamamlanmış bir vaziyettedir [4]. Bununla beraber İstanbul-Edirne YHD hattının inşasına başlama sürecine girmiştir. Ülkemizde ikinci bir Ankara-İstanbul YHD hattı düşünülmekte olup bu hattın Bolu üzerinden geçmesi planlanmaktadır. Dolayısı ile bu söz konusu hat kilometre uzunluğu olarak hâlihazırdaki hattan daha kısa olacak olup daha üst düzey bir altyapı üzerinde olması nedeni ile de 300-350 km/saat'lik işletim hızlarına ulaşabilecektir. Bu durumda iki kent arasındaki YHD seyahat süresi 60-90 dakikalık zaman dilimlerine kadar inebilecektir. Ülkemiz günümüz itibari ile hat kilometreleri de göz önünde bulundurulduğunda küresel ölçekte, YHD sektöründe Japonya, Fransa, Çin, İspanya ve Almanya'dan sonra 6.sırada zikredilebilir bir durumdadır [4].

#### **Materyal ve Yöntem**

Gelişmiş ülkelerde yıllık altyapı yatırım bütçelerinin toplam bütçeden aldığı pay azdır. Zira bu ülkeler gelişmiş seviyeye geldiklerinden kısmi sorunlar ve periyodik harcamalar dışında büyük altyapı projelerine girişmemekte ve dolayısı ile de altyapıya büyük harcamalar yapmamaktadırlar. Gelişmekte olan ülkeler ise henüz gelişim periyodunda olduklarından dolayı altyapı bu ülkelerde hem etkileyen (tetikleyen, besleyen) ve hem de etkilenen bir parametre olarak stratejik bir noktadadır [5]. Zira ekonomik kalkınma sağlam bir temel üzerine inşa edilebilir. Bu temel de altyapıdır. Gelişmekte olan ülkelerde yoğun bir altyapı kurulumu sürecinden söz edilebilir. Buradan hareketle gelişmekte olan ülkelerde yıllık bütçede altyapı yatırımlarının aldığı paylar oldukça yüksektir. Gelişmemiş ülkelerde ise henüz ekonomik ivmelenme kazanılmadığı için ne yeterli ölçüde altyapıya olan gereksinim ivmelenmiş ve ne de altyapı kurulumu için itici güç temin edilebilmiştir. Dolayısı ile bu ülkeler henüz altyapı öncesi kurulum aşamasında bulunmaktadırlar. Buradan hareketle de bu ülkelerin yıllık bütçelerinde altyapı yatırımlarının aldığı pay daha sınırlı olmaktadır.

Yüksek hızlı demiryollarının (YHD) ilk ortaya çıkışı 50 yıl önce Japonya'da Shinkansen trenleri ile olmuştur. Ardından Fransa'da TGV öncülüğünde ortaya çıkan ve ilerleyen bir yüksek hızlı demiryolu (YHD) sürecinden bahsedilebilir. Takibinde de Almanya'da ICE trenleri ile bir yüksek hızlı demiryolu (YHD) sektörü ve sistemi ortaya çıkmıştır. Uzun yıllar küresel ölçekte sektörün öncülüğü Japonya, Fransa ve Almanya'da olmuş olup aynı dönemde İtalya, Birleşik Krallık, İsveç ve benzeri ülkelerde bu ulaştırma türünde gelişimler kaydedilmiştir. Akabinde ise son on yılda İspanya ve Çin yüksek hızlı demiryollarına (YHD) hızlı bir giriş yapmış olup sektörün liderleri arasındaki yerlerini almıştır. Ülkemizin yüksek hızlı demiryollarına (YHD) giriş ve ilerleyişi de yine bu dönemdedir. İspanya'nın yüksek hızlı demiryolu (YHD) şirketi AVE iken Çin'inki ise CRRC'dir. Bu kurum adlandırmalarının hemen hepsi kendi ülke dillerinde yüksek hızlı tren anlamına gelmektedir. Günümüz itibari ile yüksek hızlı demiryolu (YHD) sisteminin öncüleri Japonya, Fransa, Çin ve İspanya'dır.

#### **Büyük Britanya**

Eurostar trenleri Belçika, Fransa ve İngiltere arasındaki Eurotunnel boyunca işletilmekte olup değişen güç operasyonları ile yedi çeşit sinyalizasyon aksamı ile çalışabilmektedir. Bu trenler TGV trenlerinin ileri bir çeşididir. Her bir trende 18 tane yolcu vagonu bulunmaktadır. Bu nedenle de Avrupa kentleri ile Londra arasında ciddi bir yolcu taşımacılığı hacmine sahip olduğu söylenebilmektedir. Birkaç büyük uçağın karşılığı olarak 794 yolcu taşıyan bir trenden söz edilebilmektedir. Kanal Tüneli (Channel Tunnel) yolu ile trenlerin İngiliz kanalını aştığından bahsedilebilir. Londra'nın Paris ve Brüksel ile bağlantısını sağlayan trenler Eurostar trenleridir. Eurotunnel aynı zamanda münhasıran bir şirket olarak teşekkül etmiş olup Kanal Tünelinin inşası ve işletmecisi konumundadır. Eurostar TGV ve Thalys ile aynı yüksek hızlı demiryolu hatlarından faydalanmakta olup yeniden gelişim periyodu paralelinde yeni bir hat yapımı da İngiltere'de söz konusu olmaktadır. Bu bahsi geçen süreç iki aşamalı olarak şekillenen ve

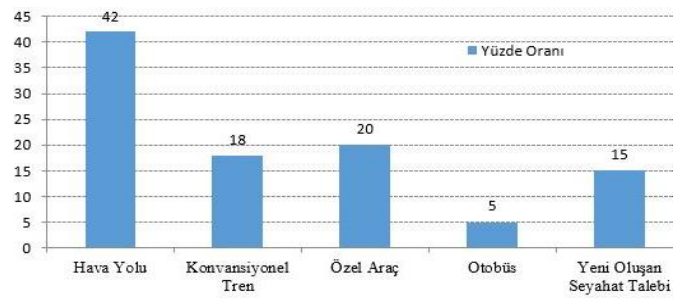
CTRL olarak bilinen Kanal Tünelindeki demiryolu bağlantısı projesidir [6].

200 km/saat işletim hızı ile Great Western Main Line'da (büyük batı ana hat) ile East Coast Main Line'da (doğu yaka ana hattı) 1976 yılından itibaren yüksek hızlı tren seferleri yapıldığı görülmektedir. Bu söz konusu hatlar Britanya'da demiryollarının yolcu taşımacılığında 20 yıldan fazla bir süredir de ana gövde konumunu almış bulunmaktadır. 10 yıllık periyotlu Ulaştırma 2010 planı ise 2000 yılında Çevre Taşımacılık ve Bölgeselleşme Bakanlığı (DETR) tarafından oluşturulmuş olup modernizasyon ve işletim ile ilgili çeşitli göndermelerde bulunur iken diğer taraftan ise yeni bir yüksek hızlı tren hat yapımı ile ilgili ise herhangi bir yaklaşım geliştirilmemektedir. Söz konusu göndermeler ise CTRL hattının bitirilmesi, hâlihazırdaki hatlarda zaman tasarruflarını arttıran ilerlemeler ve WCML başta olmak üzere hâlihazırdaki güzergâhlarda hatların modernizasyonu noktalarını içermektedir. Esasen çoğu zaman temel koridorlarda hâlihazır güzergâh altyapılarının ilerletilmesi noktası Britanya'daki demiryolu ulaştırması stratejisince desteklenmektedir. 2006 yılında mevcut hat uzunluklarının Britanya için yeterli olduğu görüşü Eddington Transport Study (ulaştırma çalışmaları birimi) tarafından, Fransa ve İspanya'daki kent merkezlerine nazaran birbirine daha kısa mesafelerde bağlandığı hareket noktası nazarı ile savunulmuştur. Eddington Transport Study, projeler büyüdükçe geri kazanım oranlarını muğlâklaşabildiğini ve bu sebep ile de yoğun güzergâhlarda yoğunluğun düşürülmesinde en önemli mali alternatifin yüksek hızlı trenlerin olduğunu ileri sürmüştür. Britanya idaresi tarafından yayınlanan Beyaz Kitap da söz konusu savunmayı desteklemektedir.

## Almanya

İngiltere'de ve birçok yerde olduğu şekli ile Almanya'da da yüksek hızlı tren hızları, demiryolu özellikleri ve altyapı nitelikleri ile limitlidir. Yolcu ve yük taşımacılıklarının ana koridorda beraber gerçekleştirildiği bir sistem söz konusu olmaktadır. 1980'li yıllarda Fransa'dakinin akabinde Almanya'da da yüksek hızlı demiryolu (YHD) sektörüne giriş gerçekleşmiştir. Almanya'nın tamamına yayılmış

olan InterCity Express (Şehirlerarası Ekspres-ICE) düzenli ve sürekli olarak yüksek hızlarda işletimi gerçekleştirmektedir. Ülkede 290 km/saat hız limitini aşan sadece iki hat bulunmaktadır, buna karşın ülkenin Avrupa'nın en büyük ekonomisi olduğunu hatırlamakta da yarar vardır. Söz konusu iki hat ise sırası ile Münih-Nuremberg ve Köln-Frankfurt'tur. Almanya'daki diğer pek çok hat ise 200 km/saat'lik işletim hızlarına haiz olmaktadır [6]. Bütün bunlar ise Fransa'daki TGV'ye nazaran düşük işletim hızlarına erişildiğine işaret etmektedir. Fransa'da TGV, Paris ve Marsilya arasını 3 saatte kat etmekte iken aynı mesafelerdeki Münih-Berlin seyahat süresi ise 6 saat olarak gerçekleşmektedir. Almanya'nın yüksek hızlı demiryolları tecrübesi köklü olup, bu konuda uzun süre Avrupa ve dünya lideri konumunda olmuştur. Fakat bununla birlikte son yıllarda bu ivmelenmesini İspanya'ya kaptırdığı görülmektedir. Şekil 2'de İspanya'nın Madrid ve Sevilya şehirleri arasında yüksek hızlı trenden önceki türel dağılım görülmektedir. Bu tablonun sebepleri, aynı konfor parametrelerini ve hız değerlerindeki gelişmeleri sürdürmeyi başaramamış olması ve önemli bazı facia niteliğinde YHD Kazalarına ev sahipliği yapmış olmasıdır. Almanya'da ICE (InterCity Express) yüksek hızlı tren hizmetini sunmakta olup, şehirlerarası yüksek hız olarak tercüme edilebilir. Ülke içinde hatlar daha ziyade Kuzey-Güney eksenli olup yer yer Doğu-Batı eksenli hatlarda mevcuttur. Ülke içinde ise ana servis güzergâhları Berlin-Münih-Hamburg-Köln ve Frankfurt merkezlidir.



Şekil 2. Yüksek Hızlı Demiryollarından önce Madrid-Sevilia arası türel dağılım [7]

Almanya, hız rekorları kırılması konusunda Fransa ile rekabet halinde olup 1986'da 346 km/saat ve 1988'de 407 km/saat'lik hız değerlerine ulaşmıştır fakat periyodik hizmetleri genellikle konvansiyonel raylar üzerinde Britanya Demiryolları süratlerinde takip etmektedir. Tepelik arazi yapıları ve düşük

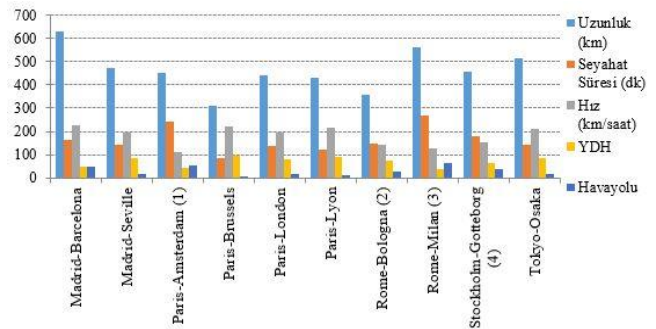
eğimli kesitlerden geçme ihtiyacı yük taşımacılığının yeni altyapılar kullanması ve mukayeseli olarak yapım maliyetlerinin yükselmesi sonucunu doğurmuştur. Ayrıca, masraflar Alman kamuoyunun yüksek çevre algısı ve hassasiyetinden etkilenmiş olup bu, daha karmaşık ve âdemi merkezîyetçi bir politik atmosfer oluşturmuştur. Bütün bunlar, yapım maliyetlerinin kaçınılmaz olarak kilometre başına neredeyse TGV'ninkinin üç katı olması anlamına gelmekteydi. Aynı zamanda, ICE'nin daha sınırlı etkilerine bağlı olarak TGV ve Shinkansen'e kıyasla trafik çekimleri de daha düşüktür [7].

ICE trenleri yeni yapılan bölümlerde 250 km/saat'lik maksimum hıza ulaşmaktadırlar. Berlin-Hannover arasındaki yüksek hızlı tren hattı 1998'de açılmış ve Ağustos 2002'de 177 km'lik önemli bir hat olan Köln-Rhine/Main yeni hattında seferler başlatılmıştır. Hâlihazırda yapım aşamasında olan diğer hatlar Nürnberg-Ingolstadt, Karlsruhe-Offenburg ve Köln-Aachen yollarıdır. ICE 2.000 km'lik bir ağa sahiptir. Bu ağın sadece yarısı 250 km/saat'ten daha fazla hıza imkân tanımaktadır. ICE yalnızca 1991 yılında işletilmeye başlamasına rağmen o zamandan beri büyük gelişmeler kaydetmiştir. İlk trenler iki lokomotif ve 723 oturma kapasitesine sahip azami 14 yolcu vagonuna sahiptiler. Yeni geliştirilen ICE 2,2, 8.000 kW'lık bir performansa sahiptir ve maksimum 330 km/saat hıza ulaşmaktadır. Bu yeni trenlerin dizaynındaki yenilik, ağırlığı eşit dağıtan ve daha fazla hızlanmayı sağlayan sürüş biriminin her vagonunda yer [7].

Bu trenlerden bazıları uluslararası seferler için değişik güç sistemlerini kullanabilecek şekilde imal edilmiştir. ICE Servisleri; ülke içi entegrasyonun yanı sıra Kopenhag (Danimarka), Zürih (İsviçre), Londra (İngiltere), Paris (Fransa), Viyana (Avusturya), Amsterdam (Hollanda) ve Brüksel (Belçika) servisleri ile de geniş bir AB Entegrasyon alanı oluşturmuştur. Almanya'da yüksek hızlı demiryolu hizmeti Haziran 1991'de ICE'nin (Şehirlerarası Ekspres) pazara girmesi ve Hamburg ve Münih'i birbirine bağlayan iki hattın açılmasıyla başlamıştır. Almanya devlet demiryolları DeutscheBahn'ın yarı bağımsız şirketi DB Fernverkehr tarafından işletilmektedir.

## Küresel Karşılaştırmalar

Amerika Birleşik Devletleri'ne kıyasla yakıt fiyatlarının daha yüksek olduğu Avrupa Birliği'nde otoyol ücretlendirme uygulamaları daha fazla görülmektedir. Geneli itibari ile yakıt fiyatları Avrupa Birliği'nde Amerika Birleşik Devletleri'ndekinin iki katı olmakla beraber coğrafi bölgeler ve zaman periyotlarına göre değişim göstermektedir. Otoyol ücretlendirmeleri Amerika Birleşik Devletleri'ndeki yolların %1,3'ü nispetinde iken bu oran Avrupa Birliği'ndeki ülkelerde kilometre bazlı olarak %12 ila %30 nispetindedir [8]. Yüksek hızlı demiryolu hatlarına göre değişen türel oranlar ve yolculuk zamanları Şekil 3'de gösterilmektedir [9]. Aynı zamanda Avrupa Birliği'nde Amerika Birleşik Devletleri'ne (ABD) nazaran demiryolu ulaştırma türü sübvansiyon uygulama süreci daha yavaştır. Diğer taraftan ise Amerika Birleşik Devletleri'nde demiryolu ulaştırma türü yük taşımacılığında sübvansiyon konusu gelir vergilerinin doğrudan olmayan yöntemler ile eyaletler ve ilgili kuruluşlar vasıtası ile gerçekleştiği (2001 yılı itibari ile 538 milyon ABD Doları) görülmekte iken yolcu taşımacılığında ise ciddi oranlarda doğrudan sübvansiyon söz konusu olmaktadır.



Şekil 3. Çeşitli Yüksek Hızlı Demiryolu hatlarında seyahat süreleri ve türel payları [9]

Genel olarak Avrupa Birliği'nde (AB) sübvansiyonların yarısından fazlası demiryolu ulaştırma türü yolcu taşımacılığına aktarılmakta olup söz konusu oranların yaklaşık yarısı yolcu ve yük taşımacılığının beraber yapıldığı hatlara yönlendirilmektedir (2001 yılı itibari ile 38,306 milyon Euro'nun 18,364 milyon Euro'luk bölümü). Demiryolu yolcu ulaştırmasının demiryolu yük

ulaştırmasından çok daha fazla önceleme, Avrupa Birliği (AB) demiryolu politikalarının olumsuz yönlerinden birisi olarak değerlendirilmekte olup bu bağlamda kentler arası yolcu ulaştırmasında demiryolunun paylarına göz atıldığında, Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) bunun yalnızca %0,32 iken Avrupa Birliği'nde (AB) ise %6,25 olduğu göze çarpmaktadır [8]. Demiryolları karayolu ulaştırma türünün dengesiz ağırlığını dengeleyebilecek en önemli etkenlerin başında gelmektedir. Çünkü dengeli türel dağılımın ve türler arası entegrasyonun sağlanmasında demiryollarının birçok farklı etkinliği ve işlevi söz konusu olabilmektedir. Karayolu ulaştırma türündeki dengesiz ağırlık sadece diğer ulaştırma türlerinin aleyhine olan basit bir karşılıklı rekabet ilişkisine işaret etmemektedir. Bu durum bunun daha da ötesinde hem toplam ulaştırma sisteminin ve hem de karayolu ulaştırma türünün bizatihi kendisinin aleyhine bir durumdur [10]. Zira kapasitesinin üzerindeki bir yükleme, karayolu ulaştırma türünü işlevlerini aksatır ve yerine getiremez hale getirmektedir. Bunun en önemli çıktısı ise karayolu trafik güvenliği hususunda kendisini göstermektedir. Öyle ki ülkemiz halen Avrupa Birliği (AB) ülkelerine kıyasla, bütün bu ülkelerin toplamı ile karşılaştırılabilir ölçekte yıllık trafik kazası ve yıllık trafik kaza kayıpları verilerine sahiptir. Bu da başlı başına ciddi sayıda (savaş, terör vs. ile kıyaslanabilecek kadar) insan kaybına ve önemli milli varlık kayıplarına işaret etmektedir. Dengesiz türel yüklemenin daha birçok zararından da bahsedilebilir. Şu da unutulmamalıdır ki ulaştırma türleri arasındaki yegâne bağıntı, rekabet yönünde olmayıp bunun yanı sıra birbirini tamamlama, birbiri yerine ikame, entegrasyon gibi birçok işlevleri vardır. AB ve ABD'nin demiryolu ağı uzunluklarına bakıldığında birbirlerine oldukça yakın kilometreler olduğu görülmekte olup bu değerler AB için 215.000 kilometre iken ABD için ise 203.600 kilometredir [11]. Bununla birlikte Avrupa Birliği'nde yük taşımacılığında taşıma periyotları uzamakta ve trafik kaynaklı problemlere bağlı olarak da büyük gecikmeler yaşanabilmektedir. Bunun nedenleri ise sırası ile sürekli bir ulaştırmanın tam anlamı ile temin edilememesi (ulusal sınırlar, ulusal kaynaklı kurumsal ve teknolojik değişiklikler), altyapı bazlı olarak yük ve yolcu taşımacılığı ortaklaşmalarının daha fazla olması, yük taşımacılığı hızlarının nispeten daha düşük gerçekleşmesi ve yolcu taşımacılığında geçiş önceliğinin bulunması olarak özetlenebilir. Çeşitli çalışmalarda ifade edildiği üzere Amerika

Birleşik Devletleri'nde ton/kilometre maliyeti yaklaşık 1 sent iken Avrupa Birliği'nde ise bu oran 8 sent dolaylarındadır. Avrupa Birliği'nde demiryolu ulaştırması yük taşımacılık güzergâhlarının meydana getirilmesine; 913/2010 sayılı çerçeve ile girilmiş olup 2015 yılına kadar da üye ülkelere ilgili işleri bitirme mecburiyeti getirilmiştir. Bunun arkasında ise yük ulaştırmasının, çeşitli hatların yük ulaştırmasına ayrılması yolu ile güçlenmesi konusu bulunmaktadır [12].

### Yatırım Maliyeti

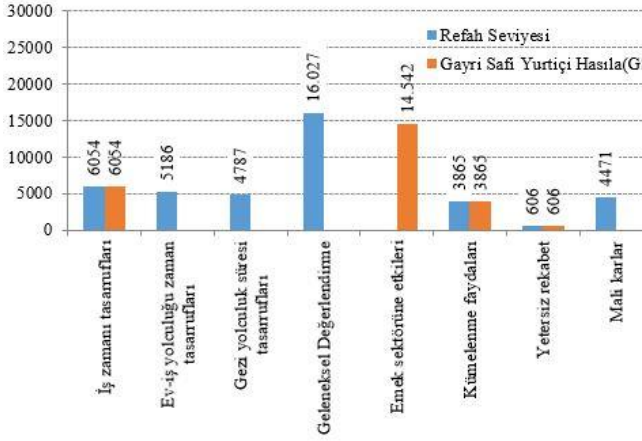
Kilometre başına maliyet, 4 milyon ABD Doları olarak konmuş ve halen en pahalı Fransız yatırımları 10-15 milyon ABD Dolarları seviyesinde gerçekleşiyor olup bu, İtalya'nın 25 milyon ABD Doları/km ve Birleşik Krallık'ın 74 milyon ABD Doları/km (Kanal Tünel Demiryolu Ağı İlk Fazı) maliyetlerinin yanında oldukça uygundur [13]. Tablo 2'de ülkelerin karşılaştırmalı YHD yapım maliyetleri ortaya konmuştur.

**Tablo 2.**Yüksek hızlı demiryolları (YHD) yapım maliyetleri [13]

YHD Yapım Maliyetleri (km başına milyon A.B.D. Doları)	
Fransa ve İspanya	10
Belçika ve Almanya	15
İtalya	25
Hollanda	53
Britanya	74
Tayvan	37
Güney Kore	37

Şekil 4'te İngiltere'de Crossrail projesinin mali etkileri görülmektedir.





Şekil 4. Crossrail projesinin refah seviyesi ve GSYİH etkileri (milyon ABD doları) [14]

## Sonuçlar ve Tartışma

Yüksek hızlı demiryollarının küresel ölçekte hâlihazır altyapılarda 200 km/saat ve üzerindeki hızlarla işletildiği anlaşılmaktadır. 200 km/saat'in üstündeki işletim hızlarına ise çok sayıda ülkede ulaşılabılır iken diğer taraftan da oldukça yüksek hızlar ise test fazında gerçekleştirilmektedir. Olağan YHD işletiminde hız üst limitleri ise ortalama 250-300 km/saat'ler olarak kaydedilmektedir. Söz konusu işletim hızları ise Fransa, Çin, Japonya, Almanya ve İspanya gibi ülkelerde gerçekleştirilmektedir [15].

Demiryolları; çevreci, az yer kaplayan, enerji verimli, petrol bağımlılığı olmayan, alternatif enerji tüketimine imkân sağlayan, karayolu ulaştırma türünün yaklaşık 6 şeritte taşıdığı yolcuyla tek hat bir işletimde taşıyabilen bir ulaştırma türüdür. Çevreye verdiği kayda değer zarar gürültü kaynaklıdır. Diğer çevre kirliliği değerleri ise karayolu ulaştırma türü ve havayolu yolcu taşımacılığının (HYT) yanında çok düşük seviyelerde kalmaktadır. Bundan da öte yüksek hızlı demiryolu (YHD) ulaştırma türünde ise demiryolu ulaştırma türünün haiz olduğu olumlu niteliklerinin hepsinin seviyesi yükselmekte olup buna ilaveten diğer hizmet parametreleri olan konfor, güvenlik ve hız da çok daha üst seviyelerde temin edilebilmektedir. Dolayısı ile yüksek hızlı demiryolu (YHD) ulaştırma türü; üst düzey hizmet parametrelerini sağlayan, çevreci,

az yer kaplayan ve havayolu ve karayolu ulaştırma türlerine nazaran daha az maliyetlere sahip bir ulaştırma türüdür. Ayrıca yüksek hızlı demiryollarının (YHD) havayolu yolcu taşımacılığına (HYT) nazaran bir diğer önemli artışı ise terminale erişim ve bekleme, kontrol gibi işlemlerinin çok daha az süre alıyor olmasıdır. Söz konusu durumda, havalimanına erişim, havalimanında uçağa binene kadar ki işlemler, bekleme ve havalimanından ayrılma süreleri göz önüne alındığında demiryollarının avantajı daha açık olarak görülebilecektir [16].

Bütün bu zaman periyodunda yüksek hızlı tren piyasasında ve hat oluşumunda birçok ülkenin dahli olacak olup doğu Asya'da ise Kore ve Tayvan öncülüğünde büyük ölçekli yatırımlar söz konusu olabilecektir. Ekonomik ve mali gereksinimler ile kapasite ihtiyaçları bağlamında Çin'in ilerletilmesini mecburi gördüğü bir husus ise kısa vade içerisinde söz konusu hizmetleri yüzölçümünün tamamına genişletme hedefleri bulunmaktadır. Diğer taraftan Çin'den dahi daha hızlı bir şekilde bu söz konusu proje yatırımlarını ivmeli bir şekilde yapması beklenen bir diğer ülke ise İspanya olarak görülmektedir. Bu söz konusu iki ülkenin de yüksek hızlı demiryolu projelerini milli bütünleşme bağlamında hayati gördüğü ve bölgesel ölçeği ile birlikte değerlendirdiği de anlaşılmaktadır [17]. Çok sayıda planlanan yüksek hızlı demiryolu (YHD) ağı söz konusu olup bunun nedeni ise bugüne kadar ki süreçte Fransa, Almanya ve Japonya gibi ülkelerde kaydedilen başarılar ve kat edilen yol olmaktadır. Hâlihazırda Tayvan, Çin, Güney Kore gibi uzak Asya ülkelerinde 7.000 kilometreden fazla uzunluktaki bir ağın inşası devam etmekte olup bununla beraber 2.000 kilometre uzunluğundaki yüksek hızlı demiryolu hattının yapımı da İngiltere, Rusya, Fransa ve Almanya'da devam etmektedir [16].

Yüksek hızlı demiryolları (YHD) genel olarak 200 km/saat'in üzerindeki işletim hızlarına imkân tanıyan altyapılar üzerindeki yüksek hız (YH) sistemleridir. Günümüzde birçok ülkede ortalama 300 km/saat'teki işletim hızları ile işletilen yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattından

bahsetmek ise mümkündür [17]. Test sürüşlerinde elde edilen hız rekorları ise 500 km/saat'lerin üzerindedir. Uluslar arası Demiryolları Birliği'ne (UIC) göre ise yüksek hızlı demiryolunun (YHD); altyapı, hizmet parametreleri, çeken çekilen araç, işletme ve hız gibi birçok parametreye göre ele alınması gerekmektedir. Yüksek hızlı demiryolları teknik bir yenilik olup, daha hızlı ve etkili bir ulaştırma türü oluşturmak adına 'geleneksek demiryolları' üzerine entegre edilmiş birçok gelişim ile ortaya çıkarılmıştır [18].

### Teşekkür

Akademik çalışmalarımızda emeği geçen hocalarımıza ve arkadaşlarımıza teşekkür ederiz.

### Kaynaklar

- [1] Railway Gazette Intern,2009, The Sustainable Railway,[http://archiv.railwaygazette.com/railway-gazette-international.html?tx\\_dc5archive](http://archiv.railwaygazette.com/railway-gazette-international.html?tx_dc5archive), 63-4. (10.2009)
- [2] Kızıltaş, M. Ç., 2014, 'Yüksek Hızlı Demiryolu Politikaları - 1' <http://www.ulastirmadunyasi.com/?p=824> (01.11.2014)
- [3] 10.Kalkınma Planı Ulaştırma ve Trafik Güvenliği Ö.İ.K. Raporu, 2012, Ankara
- [4] Kızıltaş, M.C., Altan, M.F., 2017, Evaluation of Intermodal Integration On The Context Of Marmaray and Bosphorus Bridges, IRF Regional Congress, Dubai.
- [5] Altan, M.F., Kızıltaş, M.Ç., (2018) Toplu Taşımada Çok Amaçlı Karar Verme ve Metropolitan Bir Alanda Ev-İş Ulaşım Hizmeti Modellemesi, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, ULAKBİM
- [6] Ebeling, K., (2005) High-speed railways in Germany, Japan Railway and Transport Review, 40, 36-45.
- [7] Watkiss, P., Jones, R., Rhodes, D., Hardy, A., Handley ve Walker, C., (2001) A Comparative Study of the Environmental Effects of Rail and Short-haul Air Travel. Report for Commission for Integrated Transport, ED50021.
- [8] Banister, D.veBerechman, J., (2003) Transport investment and economic development, Routledge.
- [9] Anderson, J., 2005, Government ends scoping study on east coast very high speed train network, Johan Anderson MP, Australian Deputy Prime Minister, Minister for Transport andRegionalServices,[http://www.ministers.dotars.gov.au/ja/releases/2002/march/a35\\_2002.htm](http://www.ministers.dotars.gov.au/ja/releases/2002/march/a35_2002.htm) (20.06.2005).
- [10] Boarnet, M., Crane, R., 2001. Travel by Design: The Influence of Urban Form on Travel. Oxford University Press. Cambridge Systematics Inc., 1998. TCRP Report 35: Economic Impact Analysis of Transit Investment: Guide book for Practitioners. National Academy Press, Washington, D.C.
- [11] Cervero, R., 2002. Built environments and mode choice: toward a normative framework. Transportation Research Part D 7 (4), 265–284.
- [12] Dodgson, J.,Crompton, R., Bulman, E., Abegg, P., Maunder, S. ve Condorelli, D., (2004) Study of the financing of and public budget contributions to railways, NERA Economic Consulting, Final Report for European Commission, DG Tren, London.
- [13] The Transport Politic, Should the U.S. spend \$1 trillion on newinfrastructure?,<http://www.thetransportpolitic.com/>, (17/07/2012)
- [14] European Rail Research Advisory Council (ERRAC), (2005) Strategic Rail Research Agenda (SRRA), 2002.
- [15] T.C. UDHB 11. UDH Şurası Sektör Raporu.,[http://www.ulastirmasurasi.org/tr/main\\_page.html](http://www.ulastirmasurasi.org/tr/main_page.html), (11/03/2013)
- [16] Woolridge, J.M., 2002. Introductory Econometrics: A Modern Approach. Thomson South-Western, Cincinnati, Ohio.
- [17] Chu, Xuehao., 2004. Ridership models at the stop level. National center for transit research. Center for Urban Transportation Research, University of South Florida.
- [18] Takagi, R., (2005) High speed railways: the last 10 years, Japan Railway and Transport Review, 40, 4-7.



## Pomzadan imal edilmiş çelik lif katkılı bimsblokların mekanik özelliklerinin araştırılması

**Yaşar KAYAN**

Siirt Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Programı, Diyarbakır  
[yasarkayan.zyk56@gmail.com](mailto:yasarkayan.zyk56@gmail.com)

**Abdulhalim KARAŞİN**

Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır  
[karasin@dicle.edu.tr](mailto:karasin@dicle.edu.tr) ORCID:0000-0002-8802-0588

**Ercan IŞIK**

Bitlis Eren Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bitlis  
[eisik@beu.edu.tr](mailto:eisik@beu.edu.tr) ORCID: 0000-0001-8057-065X, Tel: (434) 222 00 30

Geliş: 07.12.2018, Revizyon: 15.02.2019, Kabul Tarihi: 29.04.2019

### Öz

Bitlis, pomza rezervi açısından oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. Pomza, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Pomzadan üretilen bimsbloklar kullanım alanlarının başında gelmektedir. Üretilen bu bimsbloklar Bitlis ve civar illere gönderilerek duvar ve döşeme malzemesi olarak kullanılmaktadır. Pomzadan imal edilen bimsblokların hafif olması yapıda oluşacak yük miktarını azaltmaktadır. Ancak bimsblokların mekanik dayanım değerleri oldukça küçük kalmaktadır. Bu çalışmada, bimsblokların mekanik dayanımlarını arttırmak adına çelik lifler kullanılmıştır. Çalışmada Bitlis ve yöresinde bulunan pomza kaynaklarından elde edilerek üretilen bimsbloklar kullanılmıştır. Değişik oranlarda çelik lif kullanılması durumunda mekanik özellikler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, çelik lif kullanılmayan numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan tüm numunelerde birim hacim ağırlık analizi, basınç dayanımları, kapiler su emme katsayısı, ısı iletkenlik katsayıları tüm numuneler için elde edilmiştir. Bu özellikler belirlenirken TS 771-3 ve ilgili diğer standartlardan faydalanılmıştır. Çalışmadaki amaç, düşük dayanımlı olan pomzadan üretilen bimsbloklarının mekanik özelliklerinin geliştirilerek yaygın olarak kullanılmasına imkan tanımaktır. Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirilmiş, öneriler yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Pomza, çelik lif, bimsblok, Bitlis

\* Yazışmaların yapılacağı yazar:

DOI: 10.24012/dumf.493530

## Giriş

Artan nüfusa paralel olarak konut talebi artmaktadır. Gün geçtikçe konut maliyetlerinde de artış gözlemlenmektedir. Yapı malzemelerinde hafiflik, dayanıklılık ve estetiklik gibi fonksiyoneller beklenmektedir (Sancak, 1998). İnşaat sektöründe hafif agrega kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır (Serir, 1999). Bu bağlamda doğal agrega sınıfında bulunan pomza madeni inşaat sektöründe ayrı bir öneme sahip olmaya başlamıştır. Pomza gibi hafif yapı malzemelerinden imalat edilecek elemanlardan dolayı yapı yükünde bir azalma sözü konusu olacaktır. Pomzadan imal edilen bimsbloklar hafif olma özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Pomza taşı, yüksek ses ve ısı izolasyonu, birim hacim ağırlığının düşük olması, kolay sıva tutması ve diğer alternatiflerine göre ekonomik oluşundan dolayı kullanım alanı oldukça geniş olan bir yapı malzemesidir. Pomza değişik özelliklerinden dolayı birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır (Gündüz, 1998; Bakış vd., 2017; Köse vd., 1997). Dünyada, pomza rezervlerinin en yüksek olduğu ülkelerin başında ABD, Türkiye ve İtalya gelmektedir (Dinçer vd., 2015). Türkiye’de pomza, İç Anadolu, Akdeniz ve Doğu Anadolu Bölgelerinde özellikle volkanik alanlarda bulunmaktadır (Toklu, 2009; Akkaş 2011). Ülkemizde pomza rezervlerinin dağılımı Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Türkiye’de illere göre pomza rezervinin dağılımı

Bitlis ilinde yer alan pomza rezervleri kullanılarak üretilen en yaygın malzeme bimsbloklardır. Bu tür malzemeler yapılarda dolgu duvar malzemesi ve asmlen döşeme

malzemesi olarak kullanılmaktadır. Pomza kullanılarak, değişik boyutlarda imal edilen bimsbloklar, Vangözü Havzası’nda çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Yapılarda değişik türden malzemeler kullanılarak inşa edilen dolgu duvarlar genel olarak mekânları bölme işleminde kullanılmaktadır. Bu duvarların taşıyıcılık özellikleri yapı tasarımında ihmal edilebilmektedir. Depremden dolayı duvarlarda yaygın hasarlar gözlemlenmektedir. Bu hasarları engellemek ve taşıyıcılık özelliklerinin artırılması adına değişik malzemelerden imal edilmiş yapının taşıyıcı olmayan dolgu duvarlarının güçlendirilmesi ile ilgili literatürde çok sayıda kaynak bulunmaktadır. Bu çalışmalarının çok büyük bir kısmında duvarlar için güçlendirme teknikleri yer almaktadır. Genel olarak çelik profiller, epoksi reçinesi, lifli çimento esaslı kompozitler, lifli polimer şerit ve kumaş, hasır çelik donatılı özel sıva ve delikli çelik levha vb. malzemeler kullanılarak duvarlar için güçlendirmeler yapılmış olup öneriler getirilmiştir (Aykaç vd., 2014; Baran ve Tankut, 2011; Korkmaz vd., 2010; Kaya vd., 2018; Tekeli vd., 2014; Leeanansaksiri vd., 2018; Aykaç vd., 2017; Ökten, 2013; Cumhuriyet vd., 2016; Büyükkaragöz vd., 2018; Özbek ve Can, 2012; Özbek vd., 2018; Amant vd., 2007).

Bimsblokların sıva tutuculuk özelliği son derece üstündür. Bu özelliklerinden dolayı inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bimsbloklarda ısı ve ses yalıtımı iyi olsa da mekanik basınç dayanımları düşük bir değer almaktadır. Bu çalışmada bimsblokların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi adına çelik lifler kullanılmıştır. Değişik oranlarda çelik lifler ilave edilerek bimsbloklar imal edilmiştir. İmal edilen malzemelerde mekanik özelliklerinin belirlenmesi adına bir takım deneyler yapılmıştır. Her bir farklı oran için değerler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yorumlanarak öneriler yapılmıştır.

Dolgu duvarlarda kullanılan yatay derzler etki eden paralel ve dik yükler altındaki dayanımları önemli bir kavramdır. Derzler yatay yönde etkiyen yüklere kesme dayanımı, dik yönde etki eden yüklere dayanım duvarın basınç dayanımı olarak ifade edilmektedir. Dolayısıyla dolgu duvarlarda basınç ve kesme dayanımları önemlidir. Kesme dayanımları da basınç dayanımları cinsinden ifade edilebilmektedir (Bayülke, 2003). Duvara etki eden yatay ve düşey yükler altındaki dayanımını doğrudan etkileyen basınç dayanım değerleri önem arz etmektedir. Pomza malzemesinden imal edilmiş dolgu duvar malzemesinin güçlendirilmesi çalışmanın özünü oluşturmaktadır. Pomzadan elde edilmiş fakat düşük mekanik özelliklere sahip olan bimsblokların özelliklerinin artırılması için yapılan ilk çalışma olması açısından bu çalışma ayrı bir öneme sahiptir. Duvarların güçlendirilmesi yerine duvar malzemesinin güçlendirilmesi çalışmanın amaçlarından biridir.

## Materyal ve Metot

Çalışmaya esas olan ve pomzadan imal edilmiş olan tüm bimsbloklarda bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5R tipli çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri (Çimsa,2018)

Özellikler	Değer
SiO <sub>2</sub> (%)	18.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.36
CaO (%)	63.59
MgO (%)	1.57
SO <sub>3</sub> (%)	2.65
K <sub>2</sub> O (%)	0.77
Na <sub>2</sub> O (%)	0.45
Cl (%)	0.02
Kızdırma Kaybı (%)	3.59
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3.19
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3770
Basınç Dayanımı 2 Gün (MPa)	26.33
Basınç Dayanımı 28 Gün (MPa)	56.49

Çalışmada dikkate alınan bimsbloklarda Bitlis ili, Tatvan ilçesindeki ocaktan elde edilen asidik özellikteki pomza agregası kullanılmıştır. Pomza agregasının dane çapı 11.2mm-0.125mm arasında değişmektedir.



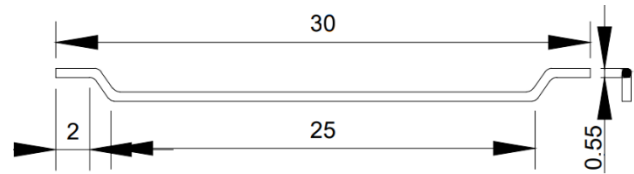
Şekil 2. Pomza agregası

Çalışmada kullanılan pomza agregasının fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Pomza agregasının kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellikler	Değer
SiO <sub>2</sub> (%)	68.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	13.56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.84
CaO (%)	0.72
MgO (%)	0.15
SrO	-----
Na <sub>2</sub> O (%)	5.33
Diğer	6.57
Kızdırma Kaybı (%)	1.92
Özgül Ağırlık(g/cm <sup>3</sup> )	2.05
Sertlik (MOHS)	5.48
Porozite (%)	44
Su Emme (%)	28

Bimsblokların mekanik özelliklerini arttırmak için kullanılan iki ucu kancalı çelik lifler 30mm yüksekliğinde olup 0.55mm çapındadır (Şekil 3).



Şekil 3. Çalışmada kullanılan çelik lif kesiti

Çalışmada kullanılan çelik liflerin özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan çelik liflerin mekanik ve fiziksel özellikleri

Lif Tipi	Çap (mm)	Boy (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Özgül Ağırlık
Çelik Fiber	0.55	30	55	1100	7.85

Çalışmada karşılaştırmalarının yapılabilmesi için kullanılan tüm bimsbloklar tek bir boyutta seçilmiştir. Kullanılan tüm numunelerin genişliği 190mm, boyu 390mm ve yüksekliği 190mm'dir. Kullanılan bimsblok örneği Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Çalışmada kullanılan bimsblok

Çalışmada öncelikle herhangi bir çelik lif katkısı olmadan kontrol numuneleri elde edilmiştir. Kontrol numuneleri, farklı oranlardaki çelik lif katkısının, mekanik özelliklere hangi ölçüde etki ettiğinin ortaya konması açısından önemlidir. Çelik lif katkısı, kullanılan pomza ağırlığına göre değiştirilmiştir. Bimsblok için kullanılan pomza ağırlığının %2, %3, %5 ve %7 oranlarında çelik lifler eklenmesi ile numuneler üretilmiştir. Oranların düşük seçilmesinin sebebi maliyetin çok arttırılmamasıdır. Çalışmadaki numunelerde dikkate alınan karışım oranlarının ağırlık cinsinden değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Çalışmada kullanılan bimsblok numunelerinin karışım miktarları

Malzeme	Ağırlık (kg/kg)
Portland Çimentosu	120
0-11.2 mm (pomza)	1200
%2 Çelik lif	24
%3 Çelik lif	36
%5 Çelik lif	60
%7 Çelik lif	84
Su	75

Çalışmada dikkate alınması için üretilen tüm bimsblok tipleri için ayrı ayrı harmanlar oluşturulmuştur. Çelik lif katkısı belirlenmiş oranlarda harman içerisine eklenerek karıştırılma işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen tüm numuneler 28 gün boyunca kür depolarında standart sıcaklıkta muhafaza edilmiştir. Kürden çıkarılan numuneler taşıtlar vasıtasıyla deneylerin yapılacağı laboratuvara taşınmıştır. Numuneler için belirlenen deneyler aynı laboratuvar ortamında gerçekleştirilerek sonuçlar elde edilmiştir. Her bir numune grubunda onar adet deney numunesi imal edilmiştir. Her bir özellik için tüm numuneler deneye tabii tutulmuş olup ortalama değerler elde edilmiştir.

## Bulgular

Elde edilen numuneler için öncelikle birim hacim ağırlık değerleri (B.H.A.) elde edilmiştir. Bu değerler, belirlenen boyutlardan hesaplanan hacme bölünmesi ile elde edilmiştir. Farklı oranlarda çelik lif katkıları içeren her 10 numune için elde edilen değerlerin ortalama alınmış birim hacim ağırlık değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Birim hacim kütle değerleri (kg/m<sup>3</sup>)

Çelik Lif Oranı	B.H.A.
%0	567
%2	570
%3	558
%5	534
%7	555

Bimsblokların, en önemli özelliklerinden biri ısı yalıtım özelliğinin iyi olmasıdır. Isıl özelliklerinin ortaya konması için numunelerin tamamı için ortalama ısı iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ ) değerleri elde edilmiştir. Deneyler, TS EN 1745 uygun olarak yapılmıştır. Farklı oranlarda çelik lif katkılı bimsbloklar için elde edilen ısı iletkenlik katsayısı değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Isıl iletkenlik katsayısı ( $W/m.k$ )

Çelik Lif Oranı	I.İ.K ( $\lambda$ )
%0	0.18
%2	0.18
%3	0.18
%5	0.18
%7	0.18

Tüm numuneler için kapiler su emme katsayıları deneyler sonucu elde edilmiştir. Kapiler su emme için örneklerin en büyük yüzeyleri su ile temas ettirilerek 24 saat boyunca kapiler su emmeleri sağlanarak, zamana bağlı olarak su emme miktarları dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Değişik oranlarda kullanılan çelik lif katkıları için elde edilen kapiler su emme katsayılarının ortalama değerleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Kapiler su emme katsayısı ( $g/m^2.sn$ )

Çelik Lif Oranı	K.S.E.K.
%0	6.60
%2	6.31
%3	5.70
%5	8.05
%7	7.93

Çalışmada bimsblokların mekanik özelliklerin artırılması adına çelik lifler kullanılmıştır. Deneylerin tamamı, TS EN 771- 3 ve TS EN 772- 1’e göre yapılmıştır. Her bir farklı çelik lif oranı için üretilen onar adet numune grupları için ortalama basınç dayanım değerleri Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 7. Basınç Dayanım Analizi (MPa)

Çelik Lif Oranı	Basınç Dayanım
%0	1.61
%2	2.18
%3	2.31
%5	2.45
%7	2.45

## Sonuç ve Öneriler

Yapı tasarımında hafif fakat mekanik özellikleri iyi olan malzemelerin kullanımı tercih edilmektedir. Bu çalışmada hafif fakat mekanik özellikleri düşük olan ve yaygın olarak duvar

malzemesi olarak kullanılan pomzadan imal edilmiş bimsbloklardır. Bitlis ilinde pomza rezervlerin kullanım alanlarının başında bimsblok üretimi yer almaktadır. Çalışmanın amacı düşük mekanik özelliklere sahip bimsbloklarının mekanik özelliklerinin artırılması adına çelik lif katkısının incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda farklı oranlarda çelik lif takviyesi yapılan bimsbloklar üretilmiştir. Her bir oran için onar adet numune kullanılmıştır.

Birim hacim ağırlık değerlerinin çok düşük çıktığı görülmüştür. Çelik lif katkı oranının artmasından dolayı birim hacim ağırlık değerinde bir artış olması gerekmektedir. Bazı oran geçişlerinde bu sağlanmıştır. Sağlanamayan oranlarda üretilen bimsblok boyutlarındaki imalat anındaki değişiminden dolayı boşluk hacmi ve kuru ağırlık değerlerinin değişiklik göstermesidir. TS 2511’e göre birim hacim ağırlık değeri  $19kN/m^3$  altında olan betonlar hafif betonlar olarak değerlendirilmektedir. Elde edilen birim hacim ağırlık değerleri bu değerden oldukça küçük çıkmıştır. Bu da malzemenin çok hafif olduğunun göstergesidir.

Pomzadan elde edilen ve herhangi bir katkı malzemesinin kullanılmadığı bimsblokların basınç dayanımları düşüktür. Bu çalışmada çelik liflerin kullanılarak pomzadan imal edilmiş bimsblokların basınç dayanımlarının artırılması amaçlanmıştır. Çelik lif katkı oranının artması elde edilen numunelerin basınç dayanımlarını büyük bir oranda arttırmıştır. Farklı oranlarda çelik lif takviyesi yapılan numunelerde %5 çelik lif oranı optimum değer olarak tespit edilmiştir. Kontrol numunesi olarak çelik lif içermeyen bimsbloklar için ortalama basınç dayanımları 1.61MPa olarak ölçülmüştür. %5 oranında çelik lif içeren numunelerde bu değer 2.45MPa olarak elde edilmiştir. Basınç dayanımları arasında %52 oranında bir değişim konusudur. Bu çelik liflerin bimsbloklarda kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

Herhangi bir malzeme için ısı iletkenlik katsayısı o malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak ne kadar ısı iletmediğini ifade etmektedir. Farklı oranlarda çelik lif takviyesi yapılan bimsbloklarda ısı iletkenlik katsayısında herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir. Çelik lif katkısının ısı iletkenlik katsayısını etkilemediği sonucu ortaya çıkmıştır. Isı iletkenlik değerinin düşük olması pomzadan üretilen bimsblokların ısıyı çok az ilettilerinin göstergesidir. Isı yalıtımı için kullanılacak bir malzeme olduğu belirlenmiştir.

Doğal ve çok gözenekli bir yapıya sahip olmasından nefes alan koku yapmayan ve sağlıklı mekânlar oluşturmak için kullanılabilir. Ayrıca Bimsblok üretim yapılırken çok yüksek bir enerji tüketimi olmamaktadır. Enerji olarak sadece vibrasyon enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Pomzadan elde edilen bimsblokların yapımında biyolojik veya kimyasal herhangi bir teknik kullanılmamaktadır. Bimsblok üretim sonucu herhangi bir atık ortaya çıkmaz. Sıfır atık bir malzeme olarak değerlendirilebilir. İşçi sağlığı açısından tehlike arz edecek herhangi bir tehlike bulunmamaktadır.

Çalışmada ayrıca yapılan ölçümler sonucu bimsblokların yangın dayanımları ölçülmüş ve yangın sınıfı A1 olarak belirlenmiştir. Bu da pomzadan imal edilen bimsblokların yangına karşı dayanımını göstermektedir. Bimsbloklarda erime sıcaklık değerleri yüksek olup bu sıcaklık değerlerine ulaştığında bile çevreye herhangi zararlı bir gaz salınımı gerçekleşmez.

Hem düşük ağırlığı, hem de ısı ve ses izolasyonu iyi olan pomzadan imal edilmiş bimsblokların basınç dayanımlarının artırılması ile deprem etkisinin bu elemanlar vereceği hasar miktarı daha aşağı seviyelere çekilebilecektir.

Çalışma çelik liflerin bimsbloklarda kullanılabilirliğini ortaya koymasından dolayı önemli bir yere sahip olacaktır. Bu açıdan

özellikle deprem bölgesinde inşa edilecek yapılarda bimsblokların daha yaygın kullanılması mümkün olacaktır.

## Teşekkür ve Katkı Belirtme

Yazarlar, çalışmada kullanılan bimsblokların temininde gösterdikleri ilgilerden dolayı Yarımada Bims firmasına ve çalışanlarına teşekkür ederler. Bu çalışma ilk yazarın devam eden yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

## Kaynaklar

- Akkaş, A., (2011). Pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun taşıyıcılık özelliklerinin araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, 131s., Isparta.
- Aykaç, B., Özbek, E., Babayani, R., Baran, M., Aykaç, S. (2017). Seismic strengthening of infill walls with perforated steel plates. *Engineering Structures*, 152, 168-179.
- Aykac, S., Kalkan, I., Seydanlioglu, M. (2014). Strengthening of hollow brick infill walls with perforated steel plates. *Earthquakes and Structures*, 6(2), 181-199.
- Amanat, K. M., Alam, M. M., Alam, M. S. (2007). Experimental investigation of the use of ferrocement laminates for repairing masonry in filled RC frames. *Journal of Civil Engineering (IEB)*, 35(2), 71-80.
- Bakış, A., Işık, E., El, A.A., Ülker, M., (2017). A study on the mixture ratio of pumice powder concrete on the concrete pavement and the construction of building. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 14(3):83-90.
- Baran, M., Tankut, T. (2011). Experimental study on seismic strengthening of reinforced concrete frames by precast concrete panels. *ACI Structural Journal*, 108(2).
- Bayülke, N., (2003). Betonarme yapının dolgu duvarı. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426(2003/4), 85-98.
- Büyükkaragöz A., Sevil N. ve Koprman Y., Gazbeton malzemesinden üretilmiş duvarların çelik lifli beton panellerle güçlendirilmesi:



- deneysel çalışma. *Politeknik Dergisi*, Kabul edilmiş makale.
- Cumhur, A., Altundal, A., Kalkan, I., Aykac, S. (2016). Behaviour of brick infill walls strengthened with expanded steel plates. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(11), 3231-3258.
- Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. 2018. <http://www.cimsa.com.tr> (Erişim Tarihi: 28.09.2018)
- Dinçer, İ., Orhan, A., Çoban, S., (2015). Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi Fizibilite Raporu, Nevşehir.
- Gündüz, L., Sarıışık, A., Tozaçan, B., Davraz, M., Uğur İ., Çankıran O. (1998). Pomza Teknolojisi Cilt – 1, 285.
- Kaya, F., Tekeli, H., Anil, Ö., (2018). Experimental behavior of strengthening of masonry infilled reinforced concrete frames by adding rebar-reinforced stucco. *Structural Concrete*. 1-14.
- Korkmaz, S. Z., Kamanli, M., Korkmaz, H. H., Donduren, M. S., Cogurcu, M.T., (2010). Experimental study on the behaviour of nonductile infilled RC frames strengthened with external mesh reinforcement and plaster composite. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(11), 2305-2316.
- Köse, H., Pamukçu, Ç., Yalçın, N., Seçer, T., (1997). Pomza ve yapı malzemesi olarak kullanım olanakları. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Ekim*, 16-17.
- Leeanansaksiri, A., Panyakapo, P., Ruangrassamee, A. (2018). Seismic capacity of masonry infilled RC frame strengthening with expanded metal ferrocement. *Engineering Structures*, 159, 110-127.
- Özbek, E., Aykaç, B., Can, H., Kalkan, İ., Aykaç, S. (2018). Delikli levhalarla güçlendirilmiş tuğla duvarların hesabı için öneriler. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*,
- Özbek, E., Can, H., (2012). Dolgu tuğla duvarların çelik profillerle güçlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(4), 921-929.
- Sancak, E. (1998). Hafif agregalı beton blokların mekanik özellikleri üzerine çelik lif kullanımının etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, 90s, Isparta
- Serin, G., (1999). Pomzanın hafif beton blok duvar elemanı olarak kullanılmasının araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, 121s, Isparta
- Tekeli, H., Akyürek, O., Deniz, M., Hersat, E., Kara, N., Tosun, U., Kaya, F., (2014). Betonarme çerçevede dolgu duvarların hasır çelik donatılı sıva ile güçlendirilmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 179-191.
- TS EN 1745, (2012). Kâgir ve kâgir mamulleri - Isıl özelliklerinin tayini yöntemleri, TSE.
- TS EN 771-3, (2012). Kâgir birimler - Özellikler - bölüm 3: Beton kâgir birimler (yoğun ve hafif agregalı), TSE.
- TS EN 772-1, (2012). Kâgir birimler - Deney yöntemleri - Bölüm 1: Basınç dayanımının tayini, TSE.
- Toklu, K., (2009). Pomza taşından üretilen bimsblok kalitesinin artırılma olanaklarının araştırılması, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, 94s., İstanbul.

## **Investigation of mechanical properties of steel fiber reinforced bimsblock materials produced from pumice**

### **Extended abstract**

*In Bitlis province, which has a significant potential for pumice, it is widely used in the construction industry. Bimsblocks produced from pumice are one of the main areas of use. Produced bimsblocks are sent to Bitlis and surrounding provinces and are used as wall material. The light weight of the bimsblocks made of pumice decreases the amount of load on the structure. However, mechanical strength values of bimsblocks remain quite low. In this study, steel fibers have been used to increase the mechanical strength of bimsblocks.*

*The infill walls, which are constructed by using different types of materials in the buildings, are generally used for dividing the spaces. The bearing characteristics of these walls can be neglected in the structure design. Common damages are observed on the walls due to the earthquake. It is possible to reinforce the non-bearing infill walls of the structure made of different materials in order to prevent these damages and to increase their bearing properties. In this study, the strengthening of the wall material was taken into consideration instead of strengthening the walls.*

*In the study, bimsblocks produced from the pumice sources in Bitlis and adjacent regions were used. Mechanical properties were determined in the case of using steel fiber in different ratios. The results obtained were compared with the sample results obtained without steel fiber. In this study, unit volume weight analysis, compressive strengths, capillary water absorption coefficient, thermal conductivity coefficients were obtained for all of the samples. When determine these characteristics, TS 771-3 and other related standards were used. The aim of the study is to enable the use of bimsblocks produced from low-strength pumice to be widely used by improving its mechanical properties. All results were evaluated and recommendations were made.*

*The strengthening of the infill wall's material which made of pumice is the essence of this study. This study is of great importance since it is the first study to increase the properties of bimsblocks with low mechanical properties obtained from the pumice.*

*Instead of strengthening the walls, the strengthening of the wall material is one of the aims of the study.*

*The increase in the ratio of steel fiber additives increased the compressive strength of the samples significantly. 5% steel fiber ratio was determined as the optimum value in steel fiber reinforced samples with different ratios. As the control sample, the average compressive strengths of the steel fiber-free bimsblocks were measured as 1.61 MPa. In samples containing 5% steel fiber, this value was obtained as 2.45 MPa. There is a 52% difference between the compressive strength of these two samples. This shows the usability of steel fibers in bimsblocks.*

*The thermal conductivity coefficient for any material refers to the amount of heat transmitted by the physical and chemical properties of the material. No change in the thermal conductivity coefficient was observed in the bimsblocks which were made of steel fiber reinforcement at different rates. It was concluded that the steel fiber additive did not affect the thermal conductivity coefficient. The low thermal conductivity value shows that the bimsblocks produced from pumice transmit the heat less. This proves that pumice is a material that can be used for thermal insulation.*

*As it has a natural and very porous structure, it can be used to create breathable, odor-free and healthy spaces. In addition to this, bimsblok does not require too much high energy during production. As energy, only the energy of vibration is needed. Bimsblocks obtained from the pumice do not use any biological or chemical techniques. Bimsblok production does not result in any waste. It can be considered as zero waste material. There is no danger in terms of occupational health.*

*By increasing the compressive strength of the pumice blocks, which are low at weight and provide well heat and sound insulation, it is possible to reduce the amount of damage caused by the earthquake effect to these elements.*

**Keywords:** *Pumice, steel fiber, bimsblock, Bitlis*



## Filtre malzemesi için çok türlü taşımacılık rotalarının performans indeksi ile vaka analizi: Hatay-Trabzon

**Ömer Faruk CANSIZ**

Iskenderun Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay  
[ofcansiz@iste.edu.tr](mailto:ofcansiz@iste.edu.tr) ORCID: 0000-0001-6857-2513, Tel: (326) 613 50 00

**Kevser ÜNSALAN\***

Iskenderun Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay  
[kevser.keskin@iste.edu.tr](mailto:kevser.keskin@iste.edu.tr) ORCID: 0000-0002-9163-4855, Tel: (326) 613 50 00

Geliş: 28.12.2018, Revizyon: 13.05.2019, Kabul Tarihi: 28.05.2019

### Öz

Çalışmada unimodal ve multimodal taşımacılık rotaları karşılaştırılmaktadır. Rota optimizasyonunda, ulaşım coğrafyasının etkisi oldukça önemlidir. Bu çalışmada Türkiye için güneyden kuzeye rota seçimi farklı güzergâh seçim kriterlerine göre bağlı olarak ele alınmaktadır. Çalışmada ayrıca multimodal taşımacılığın, unimodal taşımacılığa göre üstünlükleri araştırılmaktadır. Taşıma hesaplarını etkileyen yük çeşidi olarak Hatay'da üretimi yaygın olan ve ihracat potansiyeli yüksek, aynı zamanda iç pazarda da yerinin önemli olduğu filtre yükü dikkate alınmaktadır. Taşımacılığın güney-kuzey hattındaki değişiminin incelenmesi için varış ili olarak Trabzon dikkate alınmaktadır. Bunun için öncelikle olası iki unimodal ve üç multimodal güzergâh rotası oluşturulmaktadır. Rotalar, yakıt tüketimi, maliyet, taşıma süresi, karbondioksit salınımı gibi performans kriterlerine bağlı olarak analiz edilmektedir. Performans indeksi değerlerine göre rotalar karşılaştırıldığında, performansı en yüksek rota %91,16-73,35 performans aralığı ile multimodal 1 güzergâhı çıkmaktadır. Unimodal taşımacılığın yapılamadığı iki nokta arasında multimodal taşımacılık ile ulaşım türlerinin pozitif yanları ortaya çıkarılarak negatif durumlar ortadan kaldırılabilir. Hatay ve Trabzon arasında unimodal demiryolu taşımacılığının yapılamamasından kaynaklı olarak demiryolu taşımacılığının pozitif yanları ancak multimodal taşımacılık kullanılarak rotalara yansıtılabilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Multimodal taşımacılık, Rota optimizasyonu, Unimodal taşımacılık, Yük taşımacılığı

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Lojistik sektörünün gelişimi, uluslararası ticaretin artışı ile birlikte artmakta ve optimum dengenin kurulması için yeni yaklaşımlar araştırılmaktadır. Lojistik sektörünün en önemli alanlarından biri ise konteyner taşımacılığıdır. Dünya ticaretinin yaklaşık %90'ı konteyner ile yapılmaktadır. Konteyner taşımacılığında yükleme boşaltma sürecinden nakliyesine kadar birçok optimizasyon çalışmaları mevcuttur. Konteyner taşımacılığında nakliye aşamasında Ateş vd. (2010), denizyolu taşımacılığında konteyner taşımacılığının yerini incelemekte ve bu konuda Türkiye'deki mevcut durum incelemesi ile eksiklikleri tespit etmektedir. Sarıoğlu ve Özdemir (2006) ise kullanımı az olan akıllı konteyner sistemine Türkiye'deki lojistik firmalarının bakış açısını araştırmaktadır.

Taşımacılıkta tek türlü taşımacılığın yanı sıra çok modlu taşımacılık yaklaşımı da ön plana çıkmaktadır. Saatçioğlu ve Saygılı (2013), çok türlü taşımacılığın bir kolu olan intermodal taşımacılıkta demiryolu ve denizyolu birleşiminde hangi parametrelerin etkili olduğunu araştırmaktadır. Atar (2009), Türkiye'de kısa mesafe deniz taşımacılığı ve kombine taşımacılığın, karayolu taşımacılığının yerine kullanılabilirliğini araştırmaktadır. Atar vd. (2013) çalışmalarında kısa mesafe deniz taşımacılığı ile kombine taşımacılığın önemini farklı parametrelere bağlı olarak vurgulamaktadır.

Fremont ve Franc (2010) intermodal taşımacılık için karayolundan demiryolu taşımacılığına ağırlık vermek için mevcut durum analizi yapmaktadır. Cansız vd. (2008a,2008b) demiryolu taşımacılığının karayoluna kıyasla enerji tüketimi bakımından daha avantajlı olduğuna vurgu yapmaktadır. Ulaştırma enerji tüketimi konusunda birçok çalışma mevcuttur (Çubuk ve Cansız (2005a); Çubuk ve Cansız (2005b); Cansız (2007); Cansız vd. (2009)).

Multimodal taşımacılıkta rota optimizasyonu için birçok kritere bağlı olarak değerlendirmeler yapılmaktadır. Cansız ve Ünsalan (2018), çok türlü taşımacılığı maliyet açısından inceleyerek

tek türlü taşımacılık ile karşılaştırmaktadır. Cansız vd. (2018a) multimodal taşımacılık rotalarını maliyet, zaman ve emisyon parametreleri açısından değerlendirmektedir.

Multimodal taşımacılıkta değerlendirme kriterlerinin yanı sıra rota optimizasyonu önemlidir. Cansız vd. (2018b), multimodal taşımacılık ile güzergâh planlama çalışması yapmaktadır. Cansız vd. (2018c), multimodal taşımacılıkta rota seçimine yardımcı program geliştirmektedir. Cansız ve Göçmen (2018) parçacık sürü algoritması kullanarak güzergâh optimizasyonu için algoritma geliştirmektedir.

Yük taşımacılığında ucuz taşımacılığın yanı sıra günümüzde çevre dostu taşımacılık anlayışı da ön plana çıkmaktadır. Avrupa konseyi tarafından intermodal taşımacılık bu konuda teşvik edilmektedir. Yang ve Chen (2017), emisyon vergisinin çıkartılması ile emisyon miktarının azaltılabileceğini öne sürmektedir. Kishimoto vd. (2017) Çin'de CO<sub>2</sub> salınım fiyatlandırmasının artırılması ve karayolu emisyon uygulamalarının tam anlamıyla uygulanması ile genel emisyonun azalacağını öne sürmektedir.

Bu çalışmada multimodal ve unimodal taşımacılıkta, farklı rota seçim kriterlerine bağlı olarak rota en iyilemesi yapılmaktadır. Rota performans kriterleri için yakıt tüketimi, maliyet, zaman ve emisyon kriterlerinin yanı sıra bu dört performans kriterinin rota seçimi üzerine etkisinin eş zamanlı olarak incelenmesi için performans indeksi değeri de hesaplanmaktadır. Belirlenen performans kriterleri ve performans indeksine göre optimum rotalar belirlenerek, sonuçlara etki eden parametreler ele alınmaktadır.

Çalışmada ayrıca rota seçiminde ulaşım coğrafyasının etkilerinin ulaşım türlerine etkisinden kaynaklı olarak rota seçimini ne ölçüde etkilediği araştırılmaktadır. Böylelikle birim karar değişkenlerine göre değerlendirilen rotaların, ulaşım coğrafyasından kaynaklı sapmaların incelenmesi de yapılmaktadır. Bu amaçla Türkiye'nin güney-kuzey taşımacılık hattı incelenmektedir. Vaka analizi için Hatay ve Trabzon illeri seçilmektedir.

## Materyal ve Yöntem

Çalışmada öncelikle ilk belirlenen olan taşınacak yükün çeşididir. Bu doğrultuda Hatay'da üretimi yaygın, ihracat potansiyeli yüksek ve iç pazarda yerinin önemli olduğu filtre yükü baz alınmaktadır. Filtre fabrikalarından alınan bilgiler doğrultusunda yükün 40' konteyner ile taşındığı ve filtre yükünün türüne bağlı olarak 5, 10,14 tonluk yük birimleri ve bunlara karşılık gelen 40000 TL, 145000 TL ve 250000 TL mali değerli filtre yükleri seçilmektedir. Bu yük birimleri minimum ve maksimum koşullar ve bu koşulların ortalaması alınarak belirlenmektedir.

### Yakıt Tüketimi

Türkiye'de ulaştırma sektörün de kullanılan petrol ürünlerinin tüketiminin tüm sektörlere oranı %11,19 gibi azımsanmayacak bir orana sahiptir (TÜİK, Sektörlere ve kullanım alanlarına göre nihai enerji tüketimi, 2005). Çalışmada yenilenemez enerji kaynaklarından tasarruf amaçlı rota optimizasyonunda yakıt tüketimi güzergâh karar değişkenlerinden biri olarak seçilmektedir.

#### a) Karayolu yakıt tüketimi

Karayolu yük taşımacılığında yakıt tüketim hesabı Denklem 1'e göre hesaplanmaktadır. Taşıtın yüklü gittiği ve dönüşte başka yükler taşıdığı kabul edilmektedir. Bu nedenle taşıtın sadece gidiş yolundaki yakıt tüketimi hesaplanmaktadır. Aracın tam kapasite ile 26 ton yük taşıdığı ve tam kapasite ile yük taşırken 40 litre yakıt yaktığı kabul edilmektedir. Taşıt dönüşte boş iken 30 litre yakıt tüketmektedir (Atar, (2013)).

$$YT_{karayolu} = ((YM)/(MY) \times (YT_{max} - YT_{min}) + YT_{min}) \times (M/100) \quad (1)$$

Denklem 1'de  $YT_{kara}$ , karayolundaki tüketilen yakıt miktarını gösterirken,  $YM$ ; taşınan yük miktarı,  $MY$ ; konteynerde taşınabilecek maksimum yükü,  $M$ ; karayolu taşıma mesafesini,  $YT_{max}$  100 km'de maksimum yükün taşınmasında tüketilen yakıt miktarını,  $YT_{min}$  ise

100 kilometrede taşıtın boş iken tükettiği yakıt miktarını göstermektedir.

#### b) Demiryolu yakıt tüketimi

Demiryolu yük taşımacılığı için yakıt tüketimi Denklem 2 esas alınarak hesaplanmaktadır. Demiryolu taşımacılığında bir lokomotifte 80 adet vagon bulunduğu ve her vagonunda standart 40' konteyner taşıdığı kabul edilmektedir. Bir lokomotif 100 km tren yolunda 85-100 litre aralığında yakıt tüketmektedir (Demiryolu ve Karayolu Taşımacılığında Karşılaştırma (2018)). Çalışmada yük treninin maksimum yakıt tükettiği kabul edilmektedir.

$$YT_{demir} = ((M/100) \times OYT) / KS \quad (2)$$

Denklem de  $YT_{demir}$ , demiryolu taşımacılığında tüketilen konteyner başına düşen yakıt tüketimini,  $M$ ; demiryolu taşıma mesafesini,  $OYT$ ; bir lokomotifin 100 km'de ortalama yakıt tüketimini;  $KS$  ise bir lokomotifte taşınan konteyner sayısını göstermektedir.

#### c) Denizyolu yakıt tüketimi

Denizyolu yük taşımacılığında yakıt tüketimi için geminin seyirde ve limanda bulunma durumları dikkate alınmaktadır. Gemide ana ve yardımcı makinelerin yakıt tüketimi hesaplanmaktadır.

Seyirde ana makinenin günlük 500 ton fuel oil, yardımcı makinenin günlük 30 lt dizel yakıt tükettiği kabul edilmektedir. Limanda ise yardımcı makinenin günlük 45 lt dizel yakıt yaktığı kabul edilmektedir (Atar,(2013)). Konteyner gemileri için sürat 2010 yılı ortalama bir değer olan 25 knots alınmaktadır (Konteyner Gemileri İçin İstatistiksel Bilgiler). Limanda yükleme boşaltma süresi 3 gün kabul edilmektedir (Atar,(2013)). En büyük yük gemileri için konteyner kapasitesi maksimum 18000 adet konteynerdir. Bu çalışmada yük gemisinde 10000 adet konteyner taşıdığı kabul edilerek hesaplamalar yapılmaktadır. Denizyolu yük taşımacılığı için yakıt tüketimi Denklem 3 referans alınarak hesaplanmaktadır.

$$YT_{deniz}=(SAM_{GYT}\times SS+SYM_{GYT}\times SS+LYM_{GYT}\times LBS)/KS \quad (3)$$

Denklemden,  $YT_{deniz}$ , denizyolu taşımacılığı için konteyner başına düşen yakıt tüketimini,  $SAM_{GYT}$ , seyirde ana makine günlük yakıt tüketimini,  $SYM_{GYT}$ , seyirde yardımcı makine günlük yakıt tüketiminin,  $SS$  geminin seyir süresini,  $LYM_{GYT}$ , limanda yardımcı makine günlük yakıt tüketimini,  $LBS$ , limanda bekleme süresini,  $KS$  ise geminin bulunan konteyner adedini göstermektedir.

### Maliyet Hesabı

Taşımacılıkta optimum rota tercihi taşıma maliyetine göre yapılmaktadır (Cansız ve Ünsalan (2018)). Çalışmanın bu bölümünde rota seçimini etkileyen en önemli faktörün, farklı taşımacılık türlerine hesaplanması incelenmektedir.

#### a) Karayolu maliyet hesabı

Karayolu yük taşımacılığında maliyet Denklem 4'e göre hesaplanmaktadır. Karayolu taşımacılık maliyet kalemlerini yakıt tüketimi, sürücü ve dolaylı giderler oluşturmaktadır. 2018 yılı akaryakıt firmalarından alınan bilgilere göre dizelin litre fiyatı 5,1 TL olarak alınmaktadır. Sürücü ve dolaylı giderler, ton başına 5 TL olarak maliyete yansıtılmaktadır.

$$M_{kara}=YT_{kara}\times YF_{dizel}+SDG\times YM\times SS \quad (4)$$

Denklemden  $M_{kara}$ , karayolu için hesaplanan maliyeti,  $YT_{kara}$ , karayolunda tüketilen yakıt miktarını,  $YF_{dizel}$ , dizel yakıtın litre fiyatını,  $SDG$  değeri ton başı sürücü ve dolaylı giderleri,  $YM$  ise taşınan yükün ağırlığını,  $SS$  sürücü sayısını göstermektedir.

#### b) Demiryolu maliyet hesabı

Demiryolu yük taşımacılığında maliyet Denklem 5 referans alınarak hesaplanmaktadır. TCDD'nin İstasyonlar arası mesafe ve taşıma ücreti raporundan alınan birim fiyatlara göre demiryolu taşımacılık maliyetleri hesaplanmaktadır. Birim fiyatlara ayrıca kıymet primi eklenmektedir.

$$M_{demir}=TBF\times YM+KP \quad (5)$$

Denklemden,  $M_{demir}$ , demiryolu yük taşımacılığında maliyeti,  $TBF$  rapordan alınan birim fiyatı,  $YM$  değeri konteynerde taşınan yükün ağırlığı,  $KP$  konteynerde taşınan yükün mali değerine göre hesaplanan kıymet primidir. Kıymet primi 1000 km'ye kadar olan demiryolu mesafesinde yükün mali değerinin 1/1000'i, 1000 km den fazla mesafeler için ise mali değer 2/1000'sine denk gelmektedir.

#### c) Denizyolu maliyet hesabı

Denizyolu yük taşımacılığında maliyet hesaplaması, yakıt tüketimi, gemi personel ve dolaylı giderler, liman giderleri dikkate alınarak yapılmaktadır. Liman giderleri; terminal hizmeti, karayolu ile aktarma var ise karayolu taşıtı giriş çıkış ücreti, yükleme boşaltma gideri olarak ayrılmaktadır. Yakıt tüketimi dışında kalan ücretler TCDD Liman Hizmetleri Tarifesinden (2018) alınan birim fiyatlandırmasından alınmaktadır. Tarifeden alınan verilere göre, limanda yükleme boşaltma masrafı 352 TL/konteyner, limanda terminal hizmeti kapsamında konteyner başına 137,2 TL, limana giriş-çıkış ücreti 98 TL/araç alınmaktadır. Gemide personel ve diğer giderler ise 6,16 TL/gün/konteyner olarak hesaba katılmaktadır. Türkiye'de akaryakıt fiyatlarına uygulanan Özel Tüketim Vergisi (ÖTV) denizyolu taşımacılığı yapan gemilerin akaryakıtlarına uygulanmamaktadır. Bu nedenle denizyolu taşımacılığında fuel oil ve dizel akaryakıt fiyatlarının ÖTV'siz değerleri dikkate alınmaktadır. ÖTV'siz fuel oil 2,56 TL/kg, ÖTV'siz motorin ise 3,45 TL/lt kabul edilmektedir. Denizyolu maliyet hesabı Denklem 6 esas alınarak hesaplanmaktadır.

$$M_{deniz}=(YT_{ana}\times FOF+YT_{yardımcı}\times DF)/KS+YB+T H+LGÇ+GEG \quad (6)$$

Denklemden,  $M_{denizyolu}$ , denizyolu taşımacılığında konteyner başına düşen maliyeti,  $YT_{ana}$  parametresi ana makinenin seyirde tükettiği yakıt miktarını,  $YT_{yardımcı}$  ise yardımcı makinenin

seyirde ve limanda yaktığı yakıt miktarını, *FOF* değeri ÖTV'siz fuel oil birim fiyatını, *DF* ise ÖTV'siz dizel yakıtın birim fiyatını göstermektedir. *GEG* parametresi gemi personeli ve dolaylı giderleri, *KS* gemide taşınan konteyner sayısını, *YB* yükleme boşaltma giderini, *TH* terminal hizmeti masrafını, *LGÇ* limana giriş çıkış ücretini belirtmektedir.

### Taşımacılık Süresi Hesabı

Taşımacılık süresi yükün çıkış biriminden varış birimine kadar geçen bütün süreçleri kapsamaktadır. Yükün yükleme boşaltma, sürücü dinlenme ve seyir esnasında geçen süreç bu bölümde değerlendirilmektedir.

#### a) Karayolu taşımacılık süresi hesabı

Karayolu taşımacılık süresi Denklem 7'ye göre hesaplanmaktadır. Karayolunda yükleme boşaltma süresi 30 dakika kabul edilmektedir. Karayolunda taşımacılık süresi hesaplanırken sürücünün her 4,5 saatte 45 dakika mola verdiği kabul edilmektedir. Sürücüye ilgili mevzuat dikkate alınarak, 24 saatte en fazla 9 saat araba kullanmasına izin verilmektedir. En az iki sürücü olması halinde her 30 saatlik sürede her bir sürücü minimum 8 saat kesintisiz bir şekilde dinlenmektedir (Karayolları Trafik Yönetmeliği, Araç Kullanma ve Dinlenme Sürelerine Uyuma ve Denetleme Esasları). Taşıtın ortalama hızı 80 km/sa alınmaktadır (www.kgm.gov.tr - Şehirlerarası çift yönlü karayollarında hız sınırı). Karayolu yük taşımacılığında taşımacılık süresi Denklem 7'ye göre hesaplanmaktadır.

$$TS_{kara} = M/H + SDS + YBS \quad (7)$$

Denklemden  $TS_{kara}$  karayolu taşımacılığında taşımacılık süresini,  $M$  parametresi karayolu taşıma mesafesini,  $H$  taşıtın ortalama hızını,  $SDS$  sürücü dinlenme süresini,  $YBS$  ise yükleme boşaltma süresini göstermektedir.

#### b) Denizyolu taşımacılık süresi hesabı

Denizyolu taşımacılığında taşımacılık süresi hesabı Denklem 8'e göre hesaplanmaktadır. Denizyolu taşımacılığında konteynerin yükleme boşaltma süresi 3 gün kabul edilmektedir

(Atar,(2013)). Geminin sürati yakıt tüketim hesabı bölümünde bahsedildiği gibi 25 knot alınmaktadır.

$$TS_{deniz} = M/H + \lambda \times YBS \quad (8)$$

Denklemden,  $TS_{deniz}$  denizyolu yük taşımacılığında taşımacılık süresini,  $M$  denizyolundaki mil cinsinden kat edilen mesafeyi,  $H$  geminin hızını,  $\lambda$  katsayısı liman da operasyonel, iklimsel etmenlerden doğacak gecikmelere göre belirlenen katsayı,  $YBS$  ise limanda yükleme boşaltma süresini göstermektedir.

#### c) Demiryolu taşımacılık süresi hesabı

Demiryolu taşımacılık süresi Denklem 9'a göre hesaplanmaktadır. Demiryolu taşımacılığında konteynerin yükleme boşaltma süresi 45 dakika alınmaktadır. Avrupa ülkelerinde yük trenlerinin hızı 100 km/sa hızın üzerine çıkabilmekte iken, Türkiye'de yük trenleri maksimum 70 km/sa hıza çıkmaktadır (railturkeyakademi.wordpress.com). Bu sebeple çalışmada yük treninin hızı 70 km/sa alınmaktadır.

$$TS_{demir} = M/H + YBS \quad (9)$$

Denklemden,  $TS_{demir}$  demiryolu yük taşımacılığında taşımacılık süresini,  $M$  demiryolu taşımacılığında kat edilen mesafeyi,  $H$  trenin ortalama hızını,  $YBS$  ise yükleme boşaltma süresini göstermektedir.

### Emisyon Hesabı

Çalışmada ekonomik, hızlı rota optimizasyonunun yanı sıra çevreci rota optimizasyon anlayışı da benimsenmektedir. Taşıma aracının türüne bağlı olarak emisyon miktarı karayolu, demiryolu için Denklem 10'a göre hesaplanmaktadır (Guidelines for Measuring and Managing CO<sub>2</sub> Emission from Freight Transport Operations).

$$E = YM \times D \times EF \quad (10)$$

Denklemden,  $E$  CO<sub>2</sub> salınım miktarını,  $YM$  taşınan yükün ağırlığını,  $D$  taşıma mesafesini,

$EF$  ise ton başı  $CO_2$  emisyon faktörünü göstermektedir. Emisyon faktörü ise denklem 11'e göre hesaplanmaktadır.

$$EF = T \times M \times e / (1\ 000\ 000) \quad (11)$$

Denklemden  $T$  yük miktarını,  $M$  mesafeyi,  $e$  ise ton-km başı gram cinsinden  $CO_2$  emisyon miktarına karşılık gelmektedir. Denizyolu yük taşımacılığında emisyon hesabı Denklem 12'ye göre hesaplanmaktadır (Atar (2013)).

$$E = T \times P \times EF \times MY \quad (12)$$

Denklemden,  $E$  denizyolu yük taşımacılığında emisyon miktarını,  $T$  çalışma türünde (seyir ve manevra) geminin bulunduğu zamanı,  $P$  geminin çalışma türünde makinelerin güçlerini,  $EF$  gemi türüne göre emisyon çarpanı,  $MY$  ise makinelerin ilgili çalışma türündeki yüzde makine gücünü göstermektedir.

Gemideki ana makinenin gücü 1610 kW, yardımcı makinenin gücü 165 kW, gemideki jeneratörlerin gücü 47 kW alınmaktadır.

Gemideki ana makinenin yükü seyir esnasında %80, manevra esnasında iken ise %40 olarak alınmaktadır (Atar vd. (2013)). Konteyner gemisinin manevra süresi ise 2 saat kabul edilmektedir.

## Bulgular ve Tartışma

Bu makalede yük taşımacılığının başlangıç yeri Hatay olarak düşünüldüğünde, varış yerinin Trabzon olması taşımacılık özelliklerinin incelenmesi açısından oldukça karakteristik bir örnek olacaktır. Hatay'dan Trabzon'a demiryolu ile taşımacılık yapmak ulaşım altyapısı açısından uygun değildir. Aynı zamanda denizyolları ile taşımacılık yapmakta ulaşım mesafesinin uzamasından dolayı incelemeye değerdir. Tablo 1'de Hatay ve Trabzon arasında geliştirilen rotalar verilmektedir. Tablo 2'de ise belirlenen rotaların ulaşım modlarına göre mesafe dağılımları incelenmektedir.

**Tablo 1.** Hatay-Trabzon arası geliştirilen rotalar ve mod değişim noktaları

Ulaşım Rotası	Başlangıç Noktası	1. Ulaşım Modu	1. Mod Değişim Noktası	2. Ulaşım Modu	Varış Noktası
Unimodal Karayolu		Karayolu	-	-	
Unimodal Denizyolu	Hatay	Denizyolu	-	-	Trabzon
Multimodal 1		Demiryolu	Erzurum	Karayolu	
Multimodal 2		Demiryolu	Kars	Karayolu	
Multimodal 3		Demiryolu	Samsun	Denizyolu	

**Tablo 2.** Hatay-Trabzon arası geliştirilen rotaların ulaşım modlarına göre mesafe dağılımları

Ulaşım Rotası	Mesafe		
	Karayolu(km)	Denizyolu(mil)	Demiryolu (km)
Unimodal Karayolu	911	-	-
Unimodal Denizyolu	25,2	1402,22	-
Multimodal 1	251	-	942
Multimodal 2	414	-	1159
Multimodal 3	27,10	160,73	1019

## Yakıt Tüketimi Hesabı

### a) Hatay-Trabzon arası unimodal karayolu

Karayolu taşımacılığında yakıt tüketimini yükün ağırlığı etkilediği için hesaplar üç farklı yük tonajı için yapılmaktadır. Denklem 1'e göre

Hatay-Trabzon arasında karayolu taşımacılığında yakıt tüketimi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$YT_{kara} = ((YM)/(MY) \times (YT_{max} - YT_{min}) + YT_{min}) \times (M/100)$$



$$=(911/100) \times ((5/26) \times (40-30) + 30) = 290,82 \text{ lt}$$

dizel

10 ton yük taşınmasında;

$$YT_{kara} = ((YM)/(MY) \times (YT_{max} - YT_{min}) + YT_{min}) \times (M/100)$$

$$=(911/100) \times ((10/26) \times (40-30) + 30) = 308,34 \text{ lt}$$

dizel

14 ton yük taşınmasında;

$$YT_{kara} = ((YM)/(MY) \times (YT_{max} - YT_{min}) + YT_{min}) \times (M/100)$$

$$=(911/100) \times ((14/26) \times (40-30) + 30) = 322,35 \text{ lt}$$

dizel

5 ton yük taşınırken taşıt 290,82 lt, 10 ton yük taşınırken 308,34 lt, 14 ton yük taşınırken 322,35 lt dizel yakıt tüketmektedir. Yük ağırlığının 5 tondan 10 tona çıkması ile yakıt tüketiminde %6 artış gözlenmektedir. 14 ton taşınması ile ise taşıtın yakıt tüketimi 5 tona kıyasla %10,8 artmaktadır.

#### b) Hatay-Trabzon arası unimodal denizyolu

Hatay ve Trabzon arasında denizyolu taşımacılığı için yakıt tüketimi hesaplanırken öncelikle geminin seyir süresi belirlenmektedir. Daha sonra Denklem 2 referans alınarak denizyolu taşımacılığında yakıt tüketimi hesaplanmaktadır.

$$\text{Seyir Süresi} = \text{mesafe/hız} = (1402,22/25)/24 = 2,34 \text{ gün}$$

Seyirde Yakıt Tüketimi;

$$\text{Ana makine; } 500 \times 2,34 = 1170 \text{ ton fuel oil}$$

$$\text{Yardımcı makine; } 30 \times 2,34 = 70,2 \text{ lt dizel}$$

$$\text{Limanda Yakıt Tüketimi} = 45 \times 3 = 135 \text{ lt dizel}$$

$$YT_{deniz} = (SAM_{GYT} \times SS + SYM_{GYT} \times SS + LYM_{GYT} \times LBS) / KS = (1170 \times 1000 + 70,2 + 135) / 10000 = 117,02 \text{ lt/konteyner}$$

Denizyolu taşımacılığında yakıt tüketimi 0,138 lt/konteyner hesaplanmaktadır. Görüldüğü gibi bir konteynerin karayolunda taşınması ile bir konteynerin denizyolunda taşınması karşılaştırıldığında yakıt tüketiminde oldukça fark oluşmaktadır.

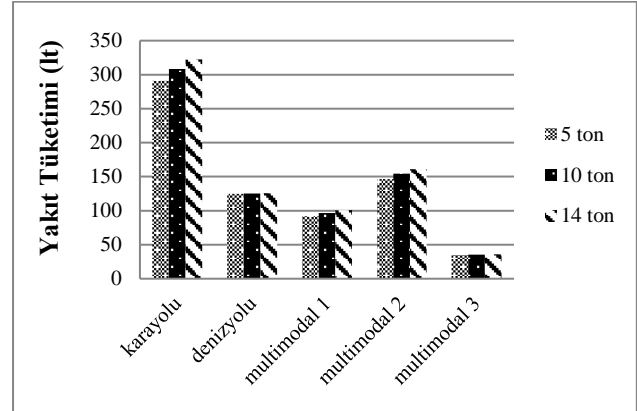
#### c) Hatay-Trabzon arası unimodal demiryolu

Hatay-Trabzon arasında yapılan yük taşımacılığında unimodal demiryolu taşımacılığı yapılamamaktadır. Multimodal 1 güzergâhı içerisinde bulunan 942 km demiryolu taşımacılığının yakıt tüketimi hesabı Denklem 3'e göre aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Konteyner başı yakıt tüketimi;

$$YT_{demir} = ((M/100) \times OYT) / KS = [(942/100) \times 100] / 80 = 11,78 \text{ lt/konteyner dizel}$$

Demiryolu taşımacılığında 11,78 lt/konteyner dizel yakıt yaktığı hesaplanmaktadır. Diğer unimodal ulaşım türleri ile karşılaştırıldığında yakıt tüketimi bakımından karayolu taşımacılığına kıyasla daha avantajlı çıkmaktadır. Fakat denizyolu taşımacılığı, demiryolu taşımacılığına göre yakıt tüketimi açısından daha avantajlıdır. Tabii ki ulaşım coğrafyasının bunun üzerinde önemli bir etkisi vardır.



Şekil 1. Hatay-Trabzon arası ulaşım türlerine göre yakıt tüketim miktarları

Hatay ve Trabzon arasında yapılan taşımacılık türlerine göre yakıt tüketim grafiği Şekil 1'de verilmektedir. Grafikte karayolu taşımacılığı ile diğer ulaşım türlerine kıyasla açık ara fazla yakıt tüketildiği görülmektedir. Yük tonajının artışı ulaşım türleri içerisinde yakıt tüketimini çok etkilememektedir. Minimum yakıt tüketimi ise multimodal 3 rotasında hesaplanmaktadır. Multimodal3 rotasında üç taşımacılık türünün dengeli kullanımı ile unimodal denizyolu

taşımacılığındaki yakıt tasarrufunun da önüne geçilmektedir.

### Maliyet Hesabı

#### a) Hatay-Trabzon arası unimodal karayolu

Hatay'dan Trabzon'a yapılacak olan konteyner yük taşımacılığı için karayolu maliyet hesabı aşağıdaki gibi yapılmaktadır. Karayolu taşımacılığında, yükün ağırlığı maliyeti belirleyen önemli parametrelerden birisidir. Bundan dolayı yük arttıkça maliyette de artış gözlenmektedir.

5 ton yük taşınmasında;

$$M_{kara} = Y_{T_{kara}} \times Y_{F_{dizel}} + S_{DG} \times Y_{M} \times S_{S} \\ = 290,82 \times 5,1 \text{ TL/l} + 5 \text{ t} \times 5 \text{ TL/t} \times 1 = 1508,18 \text{ TL}$$

10 ton yük taşınmasında;

$$M_{kara} = Y_{T_{kara}} \times Y_{F_{dizel}} + S_{DG} \times Y_{M} \times S_{S} \\ = 308,34 \times 5,1 \text{ TL/l} + 10 \text{ t} \times 5 \text{ TL/t} \times 1 = 1622,53 \text{ TL}$$

14 ton yük taşınmasında;

$$M_{kara} = Y_{T_{kara}} \times Y_{F_{dizel}} + S_{DG} \times Y_{M} \times S_{S} \\ = 322,35 \times 5,1 \text{ TL/l} + 14 \text{ t} \times 5 \text{ TL/t} \times 1 = 1713,99 \text{ TL}$$

Yük tonajının 5 tondan 10 tona çıkartılması ile birlikte maliyette %7,6, yükün 14 tona çıkması ile ise %13,65 artış görülmektedir. Yükün ağırlığı 3 kat artmasına rağmen maliyet artışı %15'in altında gözlenmektedir.

#### b) Hatay-Trabzon arası unimodal denizyolu

Denizyolu taşımacılığında konteynerin ağırlığı hesaba katılmamaktadır. Ağırlığın 5, 10, 14 ton olması maliyeti etkilememektedir. Konteyner bazında hesap yapılmaktadır. Aşağıda Hatay'dan Trabzon'a denizyolu ile giden bir yük için konteyner başı maliyet hesabı verilmektedir.

$$M_{deniz} = (Y_{T_{ana}} \times F_{OF} + Y_{T_{yardımcı}} \times D_{F}) / K_{S} + Y_{B} + T_{H} + L_{GÇ} + G_{EG} \\ = (1170 \times 1000 \times 2,56 + 205,2 \times 3,45) / 10000 + 352 + 137,2 + 98 + 6,16 \times (1,23 + 3) = 906,68 \text{ TL/konteyner}$$

Denizyolu taşımacılığında maliyeti etkileyen en önemli parametreler limanda alınan

hizmetlerden oluşmaktadır. Karayolu taşımacılığı ile karşılaştırıldığında denizyolu taşımacılığı ile yaklaşık 3,2 kat maliyette tasarruf sağlanmaktadır.

#### c) Hatay-Trabzon arası demiryolu

Aşağıda Hatay ve Trabzon arasında yapılacak Multimodal İtaşımacılığın demiryolu maliyet hesabı aşağıda verilmektedir. TCDD'nin İstasyonlar Arası Mesafe ve Taşıma Ücreti Raporundan alınan ton başı birim fiyat tarifesine göre bu iki nokta arası maliyet 82,95 TL/t hesaplanmaktadır. Bu iki nokta arası 942 km olarak bulunmakta ve bu nedenle kıymet primi yükün değerinin 1/1000'i alınmaktadır.

5 ton yük için;

$$M_{demir} = T_{BF} \times Y_{M} + K_{P} = \\ 82,95 \times 5 + 40000 \times 1/1000 = 454,75 \text{ TL}$$

10 ton yük için;

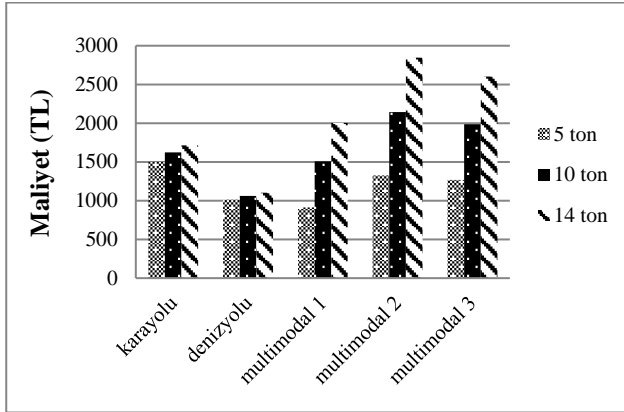
$$M_{demir} = T_{BF} \times Y_{M} + K_{P} = 82,95 \times 10 + 145000 \times 1/1000 = 974,50 \text{ TL}$$

14 ton yük için;

$$M_{demir} = T_{BF} \times Y_{M} + K_{P} = 82,95 \times 14 + 250000 \times 1/1000 = 1411,30 \text{ TL}$$

Yükün 5 tondan 10 tona çıkması ve mali değeri 40.000 TL'den 145.000 TL'ye çıkması ile taşıma maliyeti %114 artmaktadır. Yük tonajı 14 ton ve mali değeri 250.000 TL olması ile maliyet %210 artmaktadır. Burada görüldüğü gibi demiryollarında yükün kıymet değeri, maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 2'de ulaşım modlarına ve yük tonajına göre maliyet analizi verileri görülmektedir. Grafik incelendiğinde denizyolu ulaşım türünün diğer türlere göre en ucuz taşımacılık olduğu açıkça görülmektedir. En maliyetli taşımacılık ise 5 ton yük için karayolu, 10 ve 14 ton yük için ise multimodal 2 ile yapılmaktadır. Karayolunda maliyetleri arttıran en önemli faktör yakıt tüketimidir. Multimodal taşımacılık rotalarında ise maliyetleri yükselten en önemli etkilerden biri demiryolu taşımacılığında alınan kıymet primi ücretidir. Bu konuda yapılacak kıymet primi düzenlemeleri ile mali değeri yüksek olan

ürünlerin demiryolu ile taşınmasına teşvik edilmesi sağlanabilmektedir.



Şekil 2. Hatay-Trabzon arası ulaşım modlarına göre maliyet değerleri

### Zaman Hesabı

Her güzergâh için materyal metotta verilen taşımacılık süresi formülleri kullanılarak zaman hesapları aşağıdaki gibi yapılmaktadır. Deniz yolu rotasında liman faaliyetlerini aksatabilecek operasyonel ve iklimsel gecikmelerin yaşanmadığı kabul edilerek  $\lambda$  katsayısı 1 alınmaktadır.

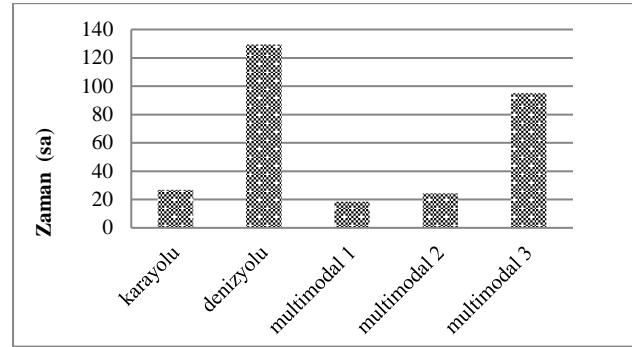
*Hatay-Trabzon arası Unimodal Karayolu için;*  
 $TS_{kara} = M/H + SDS + YBS = (911 \text{ km}) / (80 \text{ km/sa}) + 45 \text{ dk} + 30 \text{ dk} + 14,25 \text{ sa} = 26,89 \text{ sa}$

*Hatay-Trabzon arası Unimodal Denizyolu için;*  
 $TS_{deniz} = M/H + \lambda \times YBS = (1402,22 \text{ mil}) / (25 \text{ knots}) + 1 \times 3 \text{ gün} \times 24 = 128,09 \text{ sa}$

*Hatay-Trabzon arası Multimodal 1 Güzergahı içerisinde bulunan demiryolu için;*  
 $TS_{demir} = M/H + YBS = (942) / (70 \text{ km/sa}) + 45 \text{ dk} = 14,21 \text{ sa}$

Hatay-Trabzon arasında tasarlanan güzergâh senaryolarının seyahat süreleri değerleri Şekil 3'te karşılaştırılmaktadır. En hızlı taşımacılık 18,34 sa ile multimodal 1 rotasında yapılmaktadır. Karayolu rotasının, multimodal 1 rotasına göre daha uzun sürmesinin nedeni yasal sürücü araç kullanma süresi kısıtlarından kaynaklanmaktadır. Multimodal 1 rotasında ise demiryolu- karayolu kombinasyonu ile

sürücünden kaynaklı gecikmeler minimize edilmektedir. Denizyolu taşımacılık rotasının nakliye süresi açısından olumsuz çıkmasının nedeni ise liman yükleme boşaltma ve liman operasyonel süreçlerden kaynaklanmaktadır. Nakliye süresi, rota seçimini etkileyen ürünlerin taşınmasında denizyolu taşımacılığı çok tercih edilmeyen bir ulaşım türü olduğu sonuçlar ışığında desteklenmektedir.



Şekil 3. Hatay-Trabzon arası ulaşım modlarına göre taşımacılık süresi dağılımları

### Emisyon Hesabı

Hatay ve Trabzon arasında gerçekleştirilen güzergahlardan unimodal taşımacılıklara ait emisyon hesapları aşağıdaki gibi yapılmaktadır. Emisyon hesabında karayolu ve demiryolu taşımacılığında yükün tonajı dikkate alınırken, denizyolu taşımacılığında gemide çalışan makine türlerine bağlı olarak emisyon hesabı yapılmaktadır.

a) *Hatay-Trabzon arası unimodal karayolu taşımacılığı için emisyon hesabı*

*5 ton yük için;*

$$EF = T \times M \times e / (1\,000\,000) = 5 \times 911 \times 151,1 / 1000000 = 0,688 \text{ gr/t-km}$$

$$E = YM \times D \times EF = 5 \times 911 \times 0,688 = 3133,84 \text{ gr}$$

*10 ton yük için;*

$$EF = T \times M \times e / (1\,000\,000) = 10 \times 911 \times 151,1 / 1000000 = 1,38 \text{ gr/t-km}$$

$$E = YM \times D \times EF = 10 \times 911 \times 1,38 = 12571,80 \text{ gr}$$

*14 ton yük için;*

$$EF = T \times M \times e / (1\,000\,000) = 14 \times 911 \times 111,8 / 1000000 = 1,43 \text{ gr/t-km}$$

$$E=YM \times D \times EF=14 \times 911 \times 1,43= 18238,22 \text{ gr}$$

b) Hatay-Trabzon arası Multimodal 1 taşımacılık içerisindeki demiryolu taşımacılığı için emisyon hesabı

5 ton yük için;

$$EF= T \times M \times e / (1\ 000\ 000) =$$

$$5 \times 942 \times 22 / 1000000 = 0,104 \text{ gr/t-km}$$

$$E=YM \times D \times EF=5 \times 942 \times 0,104= 489,84 \text{ gr}$$

10 ton yük için;

$$EF= T \times M \times e / (1\ 000\ 000) =$$

$$10 \times 942 \times 22 / 1000000 = 0,207 \text{ gr/t-km}$$

$$E=YM \times D \times EF=10 \times 942 \times 0,207= 1949,94 \text{ gr}$$

14 ton yük için;

$$EF= T \times M \times e / (1\ 000\ 000) =$$

$$14 \times 942 \times 22 / 1000000 = 0,290 \text{ gr/t-km}$$

$$E=YM \times D \times EF=14 \times 942 \times 0,290= 3824,52 \text{ gr}$$

c) Hatay-Trabzon arası unimodal denizyolu taşımacılığı için emisyon hesabı

Seyirde Emisyon Miktarı;

$$\text{Ana makine; } E=T \times P \times EF \times MY$$

$$=2,34 \times 1610 \times 672 \times 0,80= 2025354,24 \text{ g/sefer}$$

$$\text{Yardımcı makine; } E=T \times P \times EF \times MY$$

$$=2,34 \times 165 \times 672 \times 0,80=207567,36 \text{ g/sefer}$$

$$E_{\text{seyir}} = 2025354,24 + 207567,36 = 2232921,6 \text{ g/sefer}$$

g/sefer

Manevrada Emisyon Miktarı;

$$\text{Ana makine; } E=T \times P \times EF \times MY$$

$$=1/12 \times 1610 \times 730 \times 0,40= 39176,67 \text{ g/manevra}$$

$$\text{Yardımcı makine; } E=T \times P \times EF \times MY$$

$$=1/12 \times 165 \times 730 \times 0,80=8030 \text{ g/manevra}$$

$$E_{\text{manevra}} = 39176,67 + 8030 = 47206,67 \text{ g/manevra}$$

g/manevra

Limanda Emisyon Miktarı;

$$\text{Jeneratörler; } E_{\text{liman}}=T \times P \times EF \times MY$$

$$=5,34 \times 47 \times 672 \times 0,80=134926,85 \text{ g/liman}$$

Denizyolunda Toplam Emisyon Miktarı;

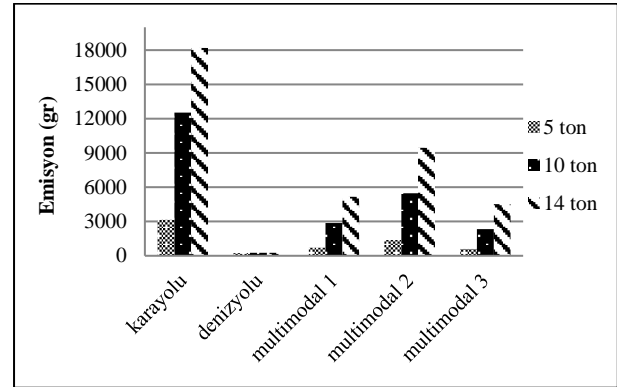
$$E_{\text{deniz(gemi)}}=E_{\text{seyir}}+E_{\text{manevra}}+E_{\text{liman}}=2232921,6+47$$

$$017,84+134926,85=2414866,29 \text{ g/gemi}$$

$$E_{\text{deniz(konteyner)}}=2414866,29/10000=241,49$$

g/konteyner

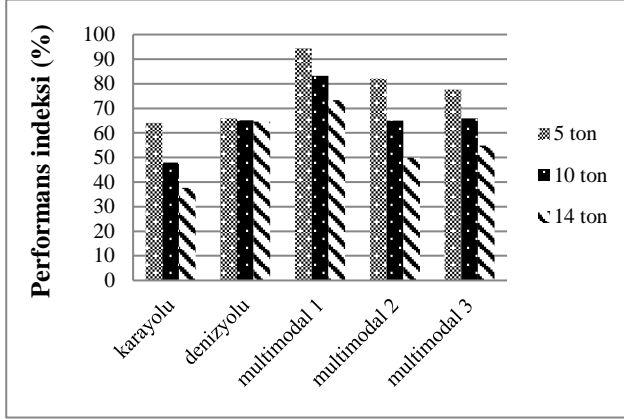
Şekil 4'te ulaşım modları ve taşınan yükün ağırlığına bağlı olarak hesaplanan emisyon miktarları verilmektedir. Grafik incelendiğinde minimum emisyon miktarı unimodal denizyolu taşımacılığında görülmektedir. En fazla CO<sub>2</sub> salınımı ise 18238,22 gr ile 14 ton yükün karayolu ile taşınmasında gerçekleşmektedir. Multimodal taşımacılık güzergahı incelendiğinde, karayolu taşımacılığına kıyasla daha az emisyon salınımı hesaplanmaktadır. Bunun nedeni ise multimodal taşımacılık güzergahının ağırlıklı denizyolu taşımacılığında oluşmasından kaynaklanmaktadır. Ülkemizde yurtiçi yük taşımacılığında ağırlıklı karayolunun tercih edilmesinden dolayı, taşımacılıktan kaynaklanan emisyon değerleri oldukça yüksektir. Taşımacılığın denizyoluna kaydırılması CO<sub>2</sub> salınımının indirgenmesinde oldukça etkili olacağı açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4. Hatay-Trabzon arası ulaşım modlarına göre emisyon miktarları

Hatay ve İzmir arasında geliştirilen güzergâh senaryolarının dört karar değişkenine bağlı olarak hesaplanan performans indeksi değerleri Şekil 5'deki grafikte görülmektedir. Grafığe göre performansı en yüksek güzergâh 5, 10 ve 14 ton için sırasıyla %94,38, %83,26, %73,31 performans ile multimodal 1 taşımacılık rotası en verimli çıkmaktadır. Bunun nedeni karar değişkenleri ayrı ayrı incelendiğinde multimodal 1 rotasının performans bakımından birinci yada ikinci sırada olmasından kaynaklanmaktadır. Rota içerisinde demiryolu

ve karayolu taşımacılık türlerinin ulaşım coğrafyasına bağlı olarak dengeli bir şekilde kullanımı, rotayı performans indeksi bakımından en üst sıraya taşımaktadır. En verimsiz güzergâh ise grafikte görüldüğü gibi tüm yük birimleri içinde karayolu taşımacılık güzergâhıdır.



Şekil 5. Hatay-Trabzon performans indeksi

## Sonuç

Bu çalışmada unimodal ve multimodal taşımacılık güzergâhları yakıt tüketimi, maliyet, zaman ve emisyon karar değişkenlerine ve performans indeksine bağlı olarak değerlendirilmektedir. Vaka analizi olarak Türkiye'nin güneyinden kuzeyine yük taşımacılığı yapılarak güney-kuzey doğrultusundaki ulaşım coğrafyasının etkisine bakılmaktadır. Bunun için Hatay ve Trabzon arasında rota optimizasyonu yapılmaktadır.

Güzergâhlardaki taşıtların yakıt tüketimi incelendiğinde en az tüketim 34,79-35,74 litre dizel ile multimodal 3 rotasında hesaplanmaktadır. İkinci en az yakıt tüketimi ise 91,90-100,59 litre ile multimodal 1 güzergâhında yakıt tüketimi hesaplanmaktadır. Rotalar içerisinde en fazla yakıt tüketimi 290,82-322,35 litre ile karayolu taşımacılık güzergâhındadır. En az tüketimin multimodal 3 rotasında görülmesinin nedeni üç ulaşım türünün dengeli bir şekilde kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Denizyolu taşımacılığının üçüncü sırada yer almasının nedeni ise ulaşım coğrafyasının etkilerinin görülmesinden

kaynaklanmaktadır. Türkiye'nin yarım ada olmasından dolayı denizyolu ile yük Türkiye'nin üç tarafını dolanmaktadır. Multimodal taşımacılık ile unimodal demiryolu taşımacılığı yapılamayan Hatay-Trabzon arasında Samsun'a kadar demiryolu taşımacılığı ve sonrasında denizyolu taşımacılığı ile yakıt verimliliği arttırılmaktadır.

Nakliye maliyetleri karşılaştırıldığında en ekonomik taşımacılık 5 ton yük için 913,40 TL ile multimodal 1 rotasıyla, 10 ve 14 ton yük için ise 1062,29 TL ve 1104,267 TL ile unimodal denizyolu rotasında yapılmaktadır. Maliyeti en yüksek rota ise 5 ton yük için 1508,18 TL ile karayolu güzergâhı, 10 ve 14 ton yük için ise 2145,23 TL ve 2843,95 TL ile multimodal 2 güzergâhı çıkmaktadır. Multimodal güzergâhlar içerisindeki demiryolu taşımacılığı yük tonajı ve değeri arttıkça maliyette ani sıçramalar meydana gelmektedir. Demiryolu taşımacılığındaki kıymet priminde azaltmaya gidilmesi maliyetlerin iyileştirilmesinde önemli etkiye sahip olacaktır.

Taşımacılık süreleri ele alındığında en hızlı taşımacılık 18,35 saat ile multimodal 1 rotasında yapılabilmektedir. Unimodal demiryolu taşımacılığının yapılamadığı Hatay'dan Trabzon'a, demiryolu ulaşım türünün avantajları multimodal taşımacılık ile sağlanabilmektedir. Rotalar içerisinde diğer karar değişkenleri bakımından avantajlı olsa da unimodal denizyolu taşımacılığı 129,40 saat ile en yavaş rota çıkmaktadır.

Rotalarda taşıt tipine bağlı olarak hesaplanan emisyon değerlerine bakıldığında en çevre dostu güzergâh 243,10-252,13 gram CO<sub>2</sub> salınımı ile denizyoludur. Çevreye en çok zarar veren rota ise 3135,03-18185,89 gram CO<sub>2</sub> ile karayolu güzergâhıdır. Multimodal taşımacılık rotaları ise karayoluna kıyasla daha çevre dostu güzergâhtır. Ülkemizde yaygın bir taşımacılık türü olan karayolu taşımacılığının çevreye oldukça zararlı olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Kurumların izleyeceği çevre politikaları doğrultusunda ileride karayolu taşımacılığının seçimi azalmaya gidecektir.

Dört karar değişkeni aynı anda değerlendirilerek güzergâhlar değerlendirildiğinde 5, 10 ve 14 ton yük taşınmasında %94,37, %83,26, %73,31 performans indeksi ile multimodal 1 güzergâhı, en uygun çıkmaktadır. İki unimodal taşımacılığın yapılabilirdiği bu iki il arasında unimodal taşımacılıkların uygun çıkmadığı görülmektedir. Güney-Kuzey doğrultusundaki ulaşım kısıtlarının multimodal taşımacılık rotaları ile aşıldığı görülmektedir. Yük aktarma istasyonlarındaki organizasyonların artırılması, nakliye firmalarının kurumsallaşması ile birlikte multimodal taşımacılığa yönelimin artacağı açık bir şekilde görülmektedir.

## Kaynaklar

- Atar, F. (2013). *Kısa Mesafe Deniz Taşımacılığının Avantajları ve Kombine Taşımacılıktaki Önemi*, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Atar, F., Aydoğdu, Y. V., Duru, O., Şenol, Y. E. (2013). Kısa Mesafe Deniz Taşımacılığının Avantajları ve Kombine Taşımacılıktaki Önemi Üzerine Bir Çalışma. *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi*, 5(1), 75-91.
- Ateş, A., Karadeniz, Ş., Esmir, S. (2010). Dünya Konteyner Taşımacılığı Pazarında Türkiye'nin Yeri, *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi*, 2( 2), 83-98.
- Cansız, O. F. (2007). Enerji Politikalarının Ulaştırma Sistemlerinin Optimizasyonu ile Geliştirilmesi ve Uygulamadan Elde Edilen Getirilerin Ortaya Konması, Yayınlanmış Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Cansız, O. F., Arslan, T., Çubuk, M. K., Çalışıcı, M. (2008a). Türkiye Demiryollarında Enerji Tüketim Analizi. 2. *International Railway Symposium & Trade Exhibition, Istanbul*, 287-306.
- Cansız, O. F., Arslan, T., Çubuk, M.K., Çalışıcı, M. (2008b). Yük Taşımacılığında Demiryollarından Uzaklaşan Türkiye'nin Enerji Kaybının İncelenmesi. 2. *International Railway Symposium & Trade Exhibition*, 241-254.
- Cansız, O. F., Çubuk, M. K., Çalışıcı, M. (2009). An Energy Analysis of Road Transportation in Turkey, *Proceedings of The 3rd International Conference on Energy and Development - Environment - Biomedicine*, 91-95.
- Cansız, O. F., Göçmen, S. (2018). Distance Analysis of Multimodal Transportation Based on Traveling Salesman Problem with Particle Swarm Optimization Method. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 5(6),1-6.
- Cansız, O. F., Ünsalan, K. (2018) Cost Analysis of Multimodal Freight Transportation : A Case of Iskenderun. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 5(5), 315-319.
- Cansız, O. F., Ünsalan, K., Çalışıcı, M., Göçmen, S. (2018a). Şehirlerarası Güzergâh Performans İndeksinin Çok Türlü Taşımacılık Baz Alınarak Analiz Edilmesi: Analiz Parametrelerinin Oluşturulması ve AUS Entegrasyonu. 1. *Uluslararası Akıllı Ulaşım Sistemleri Kongresi*, 213-214.
- Cansız, Ö. F., Ünsalan, K., Çalışıcı, M., Göçmen, S. (2018b). Şehirlerarası Taşımacılık Performansı İndeksinin Çok Türlü Taşımacılık Baz Alınarak Analiz Edilmesi: Çok Türlü Güzergâhların Tasarımı ve AUS Entegrasyonu. 1. *Uluslararası Akıllı Ulaşım Sistemleri Kongresi*, 5-8.
- Cansız, O. F., Ünsalan, K., Çalışıcı, M., Göçmen, S. (2018c). Çok Türlü Taşımacılık Güzergâhlarının Gezgini Satıcı Problemleri Baz Alınarak Tasarlanması: Güzergâhların Optimizasyonu ve Akıllı Ulaşım Sistemlerine

- Entegrasyonu. *1. Uluslararası Akıllı Ulaşım Sistemleri Kongresi*, 58-59.
- Çubuk, K., Cansız, O. F. (2005a). Türkiye’de Ulaşım Sistemleri Arasındaki Enerji Durumu, 24. Enerji Verimliliği Haftası Etkinlikleri, 17-18.
- Çubuk, K., Cansız O.F. (2005b). Energy Status Between Transportation System in Turkey. The Energy Efficiency Conference, Ministry of Energy and Natural Resources, 47-49.
- Fremont, A., Franc, P. (2010). Hinterland Transportation in Europe: Combined Transport Versus Road Transport. *Journal of Transport Geography*, 18(4), 548–556.
- İnternet- Araç Kullanma ve Dinlenme Sürelerine Uyuma Mecburiyeti ve Denetleme Esasları. URL: <https://www.tugem.com.tr/mevzuat?mlid=2528>, Son Erişim Tarihi: 10.04.2018
- İnternet- Şehirlerarası çift yönlü karayollarında hız sınırı. URL: [www.kgm.gov.tr](http://www.kgm.gov.tr), Son Erişim Tarihi: 15.04.2018
- İnternet- URL: [railturkeyakademi.wordpress.com](http://railturkeyakademi.wordpress.com), Son Erişim Tarihi:28.04.2018
- İnternet- Guidelines for Measuring and Managing CO<sub>2</sub> Emission from Freight Transport Operations. URL: [www.cefic.org](http://www.cefic.org), Son Erişim Tarihi: 02.05.2018.
- İnternet- Demiryolu ve Karayolu Taşımacılığında Karşılaştırma. URL: <http://www.ustaokan.com/?Syf=26&Syz=530815>, Son Erişim Tarihi: 22.05.2018.
- Kishimoto, P. N., Karplus, V. J., Zhong, M., Saikawa, E., Zhang, X., Zhang, X., (2017). The Impact of Coordinated Policies on Air Pollution Emissions from Road Transportation in China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 30-49.
- Nas, S. (2010) “Konteyner Gemileri İçin İstatistiksel Bilgiler” 15.Kasım.2010, İzmir, [www.nasmaritime.com](http://www.nasmaritime.com).
- Saatçioğlu, C., Saygılı, M. S. (2013). İntermodal Taşımacılıkta Denizyolu- Demiryolu Entegrasyonunun Ekonomik ve Çevresel Açından Değerlendirilmesi. *Journal of ETA Maritime Science*, 1(2), 19-26.
- Sarıoğlu, D. Ö., Özdemir, M. (2016). Lojistik Süreçte Yeni Bir Uygulama ve Sektörün Bakışı: Akıllı Konteyner. *Adnan Menderes Üniversitesi Akademik Bilişim Konferansı*, 1-8.
- TCDD (2018). TCDD Liman Hizmetleri Tarifesi.
- TÜİK (a) (2005). Sektörlere ve Kullanım Alanlarına Göre Nihai Enerji Tüketimi.
- Yang, H., Chen, W., (2017). Retailer-driven Carbon Emission Abatement with Consumer Environmental Awareness and Carbon Tax: Revenue-sharing Versus. *Omega*, 78, 179-191.

## Case study with the performance index of multimodal transport routes for the filter material: Hatay-Trabzon

### Extended abstract

*In this study, unimodal and multimodal transport routes are compared. The effect of transportation geography is very important in route optimization. In this study from south to north route selection in Turkey is examined routes depending on the selection different criteria. For this purpose, a case study is carried out for the filter load carried from Hatay to Trabzon. Two possible unimodal and three multimodal route routes are created for this purpose. Routes are analyzed based on performance criteria such as fuel consumption, cost, transport time, carbon dioxide emission.*

*When the fuel consumption of the vehicles on the routes is examined, the minimum fuel consumption is calculated with 34.79-35.74 liters of diesel on the multimodal 3 route. The second, 91.90-100.59 liters, calculates the minimum fuel consumption on the unimodal sea route. The highest fuel consumption is 290.82-322.35 liters on the road transportation route.*

*Compared to transportation costs, the most economical transportation is the sea route with a cost range of 1062.29-1104.27TL for 10 and 14 tons freight. The highest cost for 5 tons of freight is the highway route with a cost of 1508.18 TL. The most costly route for 10 and 14 tons of freight is the multimodal 2 route with a cost of 2145.23 TL and 2843.95TL. As the freight tonnage and value increase in the rail transport within the multimodal routes, there are sudden increases in the cost. Reducing the asset premium in railway transportation will have a significant effect on improving costs.*

*When the transportation times are considered, the fastest transportation can be done on the multimodal route with 18.35 hours. Unimodal rail transport cannot be done from Hatay to Trabzon, the advantages of the rail transport can be provided with multimodal transportation. Although it is advantageous in terms of other decision variables within the routes, unimodal maritime transport is the slowest route with 129.40 hours.*

*Considering the emission values calculated according to the vehicle type in the routes, the most environmentally friendly route is sea with 243.10-252.13 grams CO<sub>2</sub> emission range. The most damaging route is the highway route with a range of 3135.03-18185.89 grams CO<sub>2</sub>. Multimodal transport routes are a more environmentally friendly route compared to roads.*

*When the routes are compared according to the performance index values, the highest performance route is the multimodal 1 route with a 94.37%-73.31% performance range. Due to multimodal transport, the positive aspects of transportation types can be revealed between the two points where unimodal transport cannot be carried out and negative situations can be eliminated. Due to the failure of unimodal railway transportation between Hatay and Trabzon, the positive aspects of railway transportation can only be reflected on routes by using multimodal transportation.*

**Keywords:** Multimodal transport; Route optimization; Unimodal transport; Freight transport





# Farklı Katkılarla Hazırlanan Asfalt Karışımların Sünme Performanslarının İncelenmesi

**Taner ALATAŞ\***

FIRAT Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[talatas@firat.edu.tr](mailto:talatas@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0002-2762-0440, Tel: (424) 237 00 00 (5401)

**Akın İSTEK**

Firat Üniversitesi, Geoteknik Programı, Elazığ  
[aistek@firat.edu.tr](mailto:aistek@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0003-4736-1957

Geliş: 11.03.2019, Revizyon: 07.05.2019, Kabul Tarihi: 28.05.2019

## Öz

Bitümlü sıcak karışım üretiminde uygulamaya konulan bilimsel gelişmelerden biri de ılık karışım asfalt teknolojisidir. Ilık karışım asfalt teknolojisi ile daha düşük sıcaklıklarda bitümlü sıcak karışım üretimi mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, Pawma-1 (%0.35) ve Leadcap (%1.5) ile Stiren-Butadien-Stiren (SBS) (%2) asfalt katkı maddeleri kullanılarak bitümlü karışım numuneleri hazırlanmış ve bu katkı maddelerinin karışımların sünme performansına olan etkileri incelenmiştir. Bununla birlikte, sönmüş kirecin ılık karışım asfaltlarda filler olarak kullanımının bitümlü karışımların sünme performansına etkileri de incelenmiştir. Çalışmada TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen bitüm (B50/70) ve agrega olarak Elazığ Hankendi bölgesinden temin edilen kalker türü kırmataş malzeme kullanılmıştır. Modifiye bağlayıcılar hazırlandıktan sonra Marshall yöntemine göre optimum bitüm oranları belirlenerek karışım numuneleri hazırlanmıştır. Karışım numunelerinin yarısında filler yerine %2 oranında sönmüş kireç kullanılmıştır. Ilık karışımlarda, agrega ve bağlayıcı malzeme sıcak karışım asfaltlara oranla daha düşük sıcaklıklarda karıştırılıp sıkıştırılmıştır. Optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan bitümlü karışım numuneleri üzerinde 40°C sıcaklıkta ve 500 kPa gerilme seviyesinde dinamik sünme deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlardan sönmüş kireç katkısının bütün karışımların sünme performansını arttırdığı görülmüştür. Leadcap modifiyeli karışımların sünme performanslarının, kontrol numunelerine göre küçük bir oranda azaldığı, Pawma-1 modifiyeli karışımların ise sünme performanslarının kontrol numunelerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. SBS modifiyeli karışımların sünme performanslarının, tüm diğer karışımlardan yüksek olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ilık karışım asfalt; Sünme; Stiren-Butadien-Stiren; Leadcap; Pawma-1

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Artan trafik yoğunluğu ve dingil yükleri, esnek kaplamalarda kullanılan bitümlü karışımların performansının hızla azalmasına neden olmaktadır. Yollardaki bozulma işaretleri; çatlaklar, tekerlek izi oluşumu, yüzeyde malzeme kaybı ve cilalanmadır. Tekrarlı yükleme altındaki bitümlü karışımların kalıcı deformasyonu nedeniyle oluşan tekerlek izi esnek kaplamaların hizmet ömürlerinin kısalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple esnek kaplama tasarımında sünme davranışının dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Tekerlek izi derinliğinin tahmini için bitümlü karışımların sünme davranışını etkileyen faktörlerin iyi anlaşılması gerekmektedir (Öcal, 2001). Taşıt hızlarının bir fonksiyonu olan yükleme sürelerinin bitümlü karışımların yüke olan tepkileri üzerinde doğrudan etkisi olmaktadır. Fiziksel olarak sünme davranışı, kendisini tekerlek izi olarak göstermekte ve genellikle trafik akışının yüksek ve hızın düşük olduğu yollarda görülmektedir (Uluğtekin, 1999).

Karıışımların performansının geliştirilmesine ek olarak, üretimde enerji tasarrufunun sağlanması ve çevreye verdiği zararlı etkilerin azaltılması da amaçlanmaktadır. Daha düşük maliyetli ve çevreye daha az zararlı bitümlü karışımlar hazırlamak amacıyla dünyada çeşitli teknolojiler geliştirilmiş ve bitümlü karışımların karıştırma sıcaklıkları düşürülmüştür (Bueche, 2009; Olard ve Noan, 2007). Ilık karışım asfalt, bitümlü karışımların karıştırma sıcaklıklarının düşürülmesine olanak sağlayan teknolojileri ifade etmektedir. Bu teknolojilerin amacı, bağlayıcıların viskozitesini düşürerek bitümlü sıcak karışımlara oranla 20°C ile 55°C daha düşük sıcaklıklarda bağlayıcının agregayı tamamen sarması ile agrega ile bağlayıcı arasında gerekli aderansın sağlanmasıdır (D'Angelo vd., 2008). Düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı, ılık asfalt kaplamaların soğuma süresinin azalmasını böylece yolun sıcak asfalt kaplamaya oranla trafiğe daha erken açılmasına olanak sağlamaktadır. Havaalanı kaplamalarında yapılması gereken bakım onarım işlerinde yolun uzun zaman trafiğe kapalı

kalmaması gerektiğinden ılık asfalt kullanımı yerinde bir tercih olacaktır (Su vd., 2009).

Çalışmada, Pawma-1 ve Leadcap katkı maddeleri kullanılarak ılık karışım asfalt numuneleri hazırlanmıştır. Pawma-1 ılık karışım asfalt katkısı ülkemizde üretilmektedir. Pawma-1 ile modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde yapılan deneylerde viskozitenin ve penetrasyonun azaldığı, yumuşama noktasının ise arttığı görülmüştür (İstek ve Alataş, 2017). Leadcap, Kumho Petrokimyasal şirketi ile Kore İnşaat Teknoloji Enstitüsü işbirliği ile geliştirilen bir ılık karışım asfalt katkı maddesidir. Leadcap ilavesi ile bağlayıcının viskozitesinin düştüğü ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özelliklerinin iyileştiği görülmüştür (Kim vd., 2014). Xiao ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, Sasobit, Rediset WMX, Cecabase ve Evotherm ılık karışım asfalt katkı maddelerinin bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansına olan etkileri incelenmiş, çalışma sonuçları ılık karışım asfalt katkı maddelerinin yavaşça viskoziteyi azalttığını ve böylece karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının düştüğünü göstermiştir. Kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında, ılık asfalt katkı maddeleri az bir oranda bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını arttırarak kaplamanın tekerlek izine karşı direncini yükseltmişlerdir. Sasobit katkılı bağlayıcıların kompleks kayma modülleri az miktarda artmış fakat diğer katkı maddeli bağlayıcılara göre daha düşük faz açısı ve sünme esnekliği sergilemişlerdir. (Xiao vd., 2012). Kim ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, atık lastik parçacıkları ve Leadcap ılık karışım asfalt katkısı içeren bağlayıcıların yüksek, orta ve düşük sıcaklıklardaki reolojik özellikleri incelenmiştir. Superpave bağlayıcı deneyleri yapılmıştır. Ilık karışım asfalt katkı ilavesi ile bağlayıcının viskozitesi düşmüş, yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri iyileşmiş, düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımı artmıştır. Atık lastik ilavesi de asfalt bağlayıcının tekerlek izi ve çatlak oluşumuna karşı dayanımını olumlu bir şekilde etkilemiştir (Kim vd., 2014).

Bitümlü sıcak karışımların trafik yüklerine ve sıcaklığa karşı dayanımlarını arttırmak amacıyla

çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkı maddelerinden yaygın olarak kullanılan Stiren-Butadien-Stiren (SBS) kopolimeridir. Yapılan çalışmalarda SBS'nin bitümlü sıcak karışımların yorulma, düşük ısı çatlakları ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını arttırdığı görülmüştür. Sıcak iklimin hüküm sürdüğü bölgelerde tekerlek izi oluşumuna karşı SBS kullanımının, bağlayıcı nedenli bozulmaların engellenmesine yardımcı olacağı, yüksek maliyetli bakım ve onarım masraflarının geciktirilmesini sağlayacağı görülmüştür (Yılmaz ve Kök, 2008). Alataş ve Kizirgil'in yaptıkları bir çalışmada, uçucu kül ve SBS birlikte kullanılmış ve hazırlanan numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. SBS ve uçucu kül kullanımı ile karışımların normal sıcaklıklardaki rijitliklerinin, stabiliteilerinin, yorulma ömürlerinin, nem hasarına ve kalıcı deformasyona karşı dirençlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu katkıların birlikte kullanılması ile bu olumlu etkilerin artacağı görülmüştür. Katkı maddeleri ayrı ayrı değerlendirildiğinde SBS'nin uçucu küle oranla daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte karışımdaki SBS oranının artması ile uçucu külün etkinliğinin azaldığı görülmüştür (Alataş ve Kizirgil, 2013). Şengül ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, SBS modifiyeli taş mastik asfaltların kaplama performansı araştırılmıştır. Marshall oranı yaklaşımı ile optimum bitüm içerikleri hesaplanan numuneler üzerinde tekrarlı sünme, indirekt çekme rijitlik modülü ve tekerlek izi deneyleri yapılmıştır. Modifiye edilen numunelerin rijitlik modülleri ve tekerlek izine karşı dirençleri artmıştır (Şengül vd., 2013).

Bitümlü karışımlara sönmüş kireç ilave edilmesinin trafik yüklerinden doğan gerilmelerin yayılmasında yardımcı olduğu ve dayanımı arttırdığı, tekerlek izi oluşumuna karşı direnci arttırdığı görülmüştür (Little vd., 2006). Johansson tarafından yapılan bir çalışmada, sönmüş kireç soyulma önleyici katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Çalışma neticesinde sönmüş kireç ilavesinin bağlayıcının erken yaşlanmasını geciktirdiği böylelikle adezyon kuvvetini arttırdığı ortaya çıkmıştır (Johansson, 1995). Mohammad ve Abadie'nin yaptıkları bir

çalışmada, sönmüş kirecin polimer katkılarla birlikte kullanıldığı zaman faydalarının daha da arttığı, bu performans artışlarının yalnız başına kullanılmasına kıyasla oldukça fazla olduğu görülmüştür (Mohammad ve Abadie, 2000). Lesueur ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, sünme testleri neticesinde sönmüş kireç ilavesi ile yüksek sıcaklıklarda stabilite artışı sağlanmıştır. Sönmüş kirecin bitümün viskozitesini artırırken aynı zamanda suyun zararlı etkilerine karşı direncini de arttırdığını tespit edilmiştir. Bitümlü sıcak karışıma sönmüş kireç ilave edilmesi ile meydana gelen reolojik değişimler ve oksidatif sertleşme değişimleri araştırılmış ve kirecin olumlu sonuçlar sağladığı görülmüştür (Lesueur vd., 1998).

Bu çalışmada SBS, Pawma-1 ve Leadcap katkı maddeleri kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Leadcap ve Pawma-1 modifiyeli ılık karışımlar diğer karışımlara göre daha düşük sıcaklıklarda karıştırılıp sıkıştırılmıştır. Hazırlanan modifiye bitümlerle optimum bitüm içeriklerinde Marshall karışım numuneleri üretilmiştir. Hazırlanan karışımların yarısında filler olarak %2 oranında sönmüş kireç kullanılmıştır. Bitümlü karışım numuneleri üzerinde dinamik sünme deneyi uygulanmıştır. Hazırlanan ılık karışım asfaltların sünme performansları belirlenmiş, katkısız ve SBS katkılı sıcak karışım asfaltlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca filler olarak %2 oranında kullanılan sönmüş kirecin sünme performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

## Materyal ve yöntem

### Karışım numunelerinin hazırlanması

Deneysel çalışmalarda agrega olarak Elazığ Hankendi bölgesinden temin edilen kalker türü kırmataş malzeme ve bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 50/70 sınıfı bitüm kullanılmıştır. Ilık karışım asfalt katkı maddeleri olarak İstanbulteknik firmasında üretilen Pawma-1 ve Kumho firması tarafından üretilen Leadcap (Low Energy and Low Carbon-Dioxide Asphalt Pavement) kullanılmıştır. Sıcak karışım asfalt katkı maddesi olarak Shell firması tarafından üretilen SBS (Stiren-Butadien-Stiren) kullanılmıştır. Bu katkıları bağlayıcıya ilave

edilerek bağlayıcı malzeme modifiye edilmiştir. Sönmüş kireç ise agrega karışımındaki filler malzemenin belirli bir miktarının yerine kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özellikleri

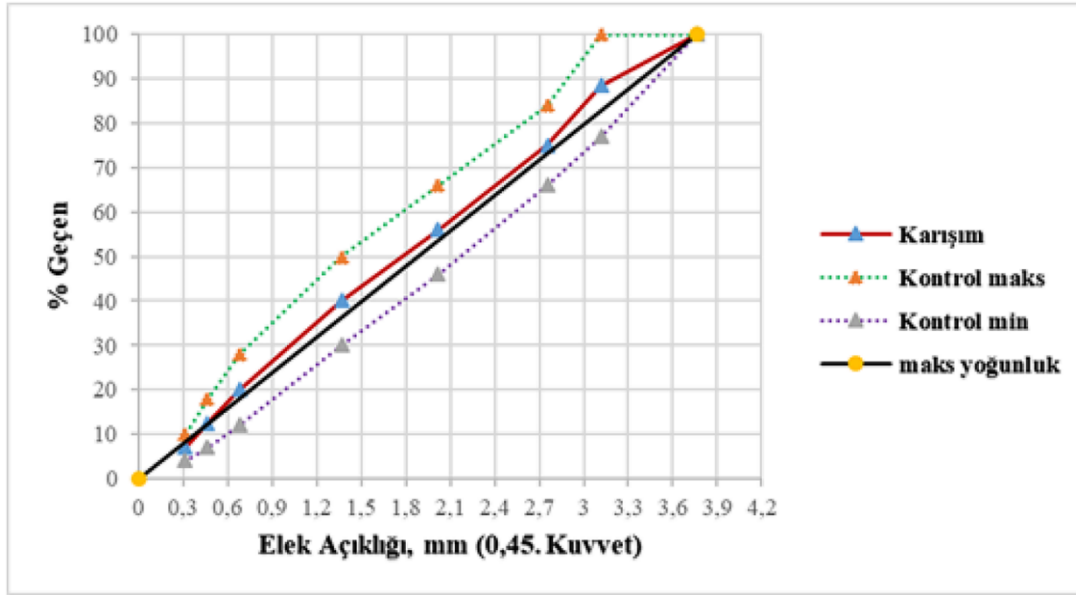
Tablo 1’de, kullanılan gradasyon Tablo 2’de ve gradasyon eğrisi Şekil 1’de verilmiştir. Bağlayıcı malzemeye ait özellikler Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	Standart	Şartname Limitleri	Kaba	İnce	Filler
Dayanıklılık (Los Angeles Aşınma Kaybı), %	TS EN 1097-2	maks 30	24		
Sağlamlık (MgSO <sub>4</sub> ile Donma Kaybı), %	TS 1367-2	maks 18	6.5		
Su Absorpsiyonu %	ASTM C127	maks 2	0.3		
Hacim Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127		2.677		
Hacim Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C128			2.628	
Zahiri Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127		2.698		
Zahiri Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C128			2.675	
Zahiri Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D854				2.717

Tablo2. Agregada gradasyonu

Elek Boyutu (mm)	19.00	12.50	9.50	4.75	2.00	0.420	0.180	0.075
%Geçen	100	88.5	75	56	40	20	12.5	7
Karışımındaki Agregada Yüzdeleri								
	Kaba					44		
	İnce					49		
	Filler					7		



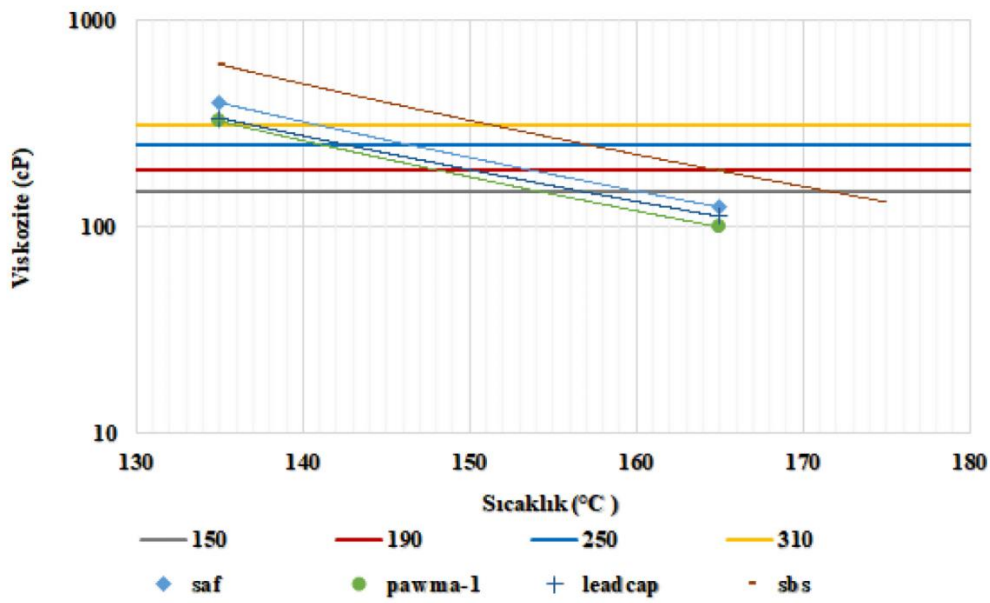
Şekil 1. Agrega gradasyon eğrisi.

Tablo 3. Saf bağlayıcının özellikleri.

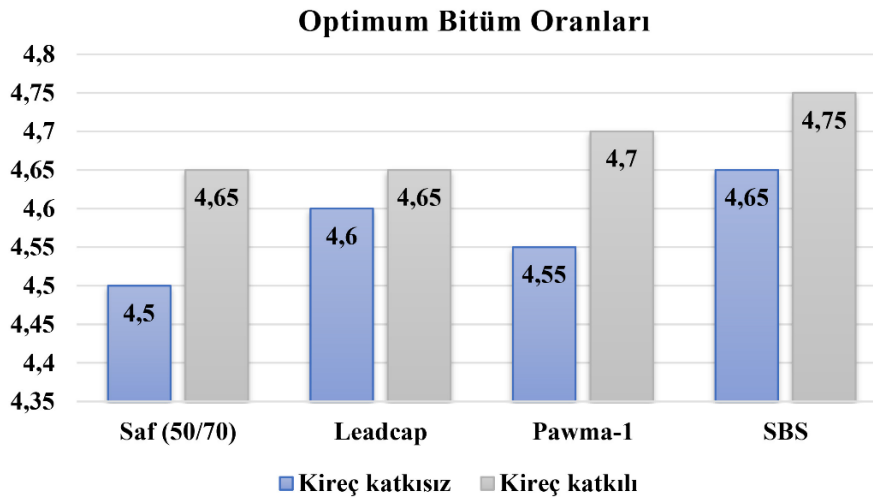
Özellikler	Standart	Sonuç	Şartname Limiti
Penetrasyon (0.1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	53	50-70
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	49.9	46-54
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-1.09	-
Özgül ağırlık	-	1.039	-
Viskozite (cP, 135°C)	ASTM D4402	400	-
Viskozite (cP, 165°C)	ASTM D4402	125	-
Karıştırma sıcaklığı (°C)	-	157	-
Sıkıştırma sıcaklığı (°C)	-	144	-
<b>RTFOT Sonrası</b>			
Kütle kaybı (%)	ASTM D2872	0.314	maks 0.5
Kalıcı penetrasyon, (%)	-	51	min 50
Yumuşama noktasındaki artış (°C)	-	4.4	maks 9
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-1.52	-

Çalışmada, öncelikle Dönel viskozimetre (RV) deneyi ile katkısız bağlayıcının karıştırma sıcaklığı 157°C, SBS katkılı bağlayıcının karıştırma sıcaklığı ise 168°C olarak bulunmuştur. Deney sonuçları Şekil 2’de verilmiştir. Üretici firmaların tavsiye ettikleri şekilde Pawma-1 %0.35, Leadcap %1.5 oranlarında katkısız bağlayıcının karıştırma sıcaklığı olan 157°C sıcaklıktaki bitüme ilave edilmiş ve 1000 devir/dakika hıza sahip karıştırıcıda 10 dakika süreyle karıştırılmıştır. SBS katkısı ise 180°C sıcaklıktaki bitüme ilave

edilmiş ve 1000 devir/dakika sahip hızdaki karıştırıcıda 1 saat süreyle karıştırılmıştır. SBS oranı %2 olarak belirlenmiştir. Yapılan çeşitli çalışmalarda en etkin kireç oranının agrega ağırlığının %2’si olduğu belirlenmiştir (Little vd., 2006). Sönmüş kireç içeren karışımlarda %2 oranında kalker filler yerine sönmüş kireç kullanılmıştır. Karışımların optimum bitüm içerikleri Marshall yöntemine göre belirlenmiştir. Sönmüş kireç içeren ve içermeyen karışımların optimum bitüm içerikleri Şekil 3’de verilmiştir.



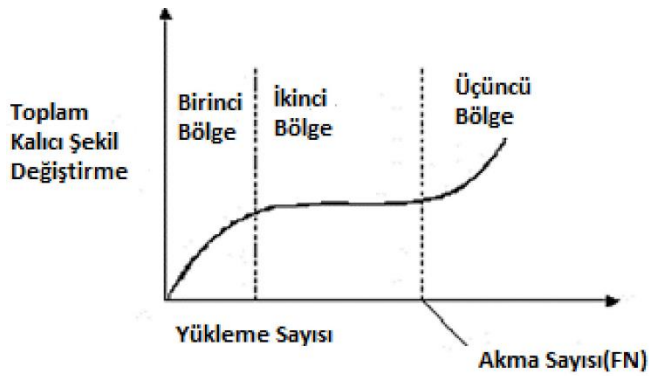
Şekil 2. Dönel viskozimetre deney sonuçları.



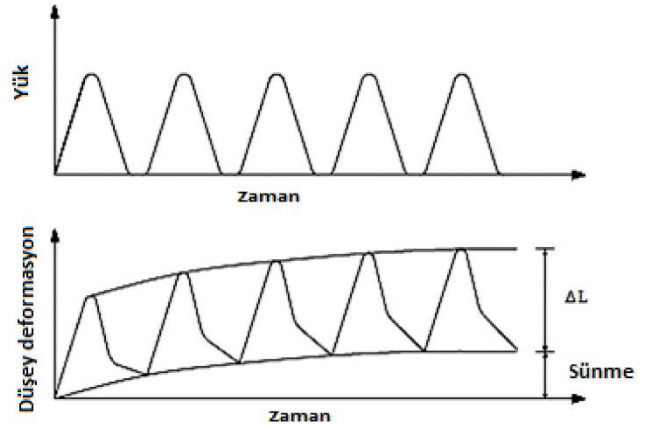
Şekil 3. Optimum bitüm içerikleri.

### Dinamik sünme deneyi

Dinamik sünme deney yönteminde sabit bir yük, silindirik karışım numunesinin yatay yüzeyine belirli devir ile mükerrer olarak uygulanmaktadır. Dinamik sünme deneyinde yük tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak ölçülen toplam kalıcı deformasyon miktarı, tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilebilmektedir. Deney, farklı sıcaklık ve yüklemelerde yapılabilmektedir. Bu deney ile ayrıca belli bir poisson oranı kabul ederek ve yatay deformasyonun ölçülmesi ile esneklik modülü de tespit edilebilmektedir. Dinamik sünme deneyinde genellikle “yük tekrar sayısı-toplam kalıcı şekil değiştirme eğrisi” sonuç olarak verilmektedir. Şekil 4’de örnek olarak gösterilen eğri 3 bölgeden oluşmaktadır. Burada akma sayısı üçüncü bölgenin başladığı yük tekrar sayısı olarak tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilmektedir. Yapılan çalışmalarda dinamik sünme deneyinin arazide ölçülen tekerlek izi derinliği ile çok iyi benzeştiği görülmüştür. Şekil 5’de yük zaman ve yük deformasyon arasındaki ilişki gösterilmektedir (Kaloush vd., 2002).



Şekil 4. Yük tekrar sayısı-şekil değiştirme ilişkisi



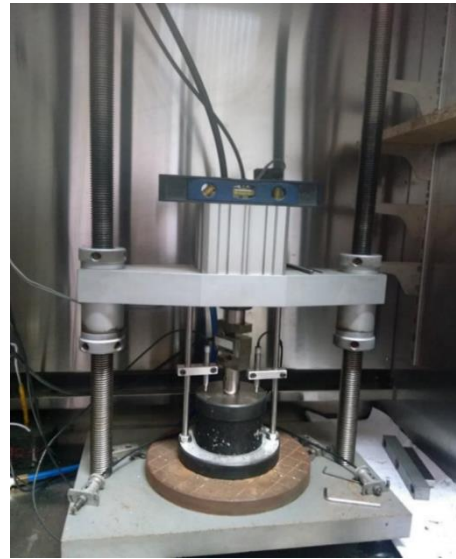
Şekil 5. Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi

Dinamik sünme deneyinde toplam eksenel birim şekil değiştirme ( $\epsilon_c$ ) ve sünme rijitliği ( $E_c$ ) Formül 1 ve 2 ile hesaplanmaktadır.

$$\epsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (1)$$

$$E_c = \sigma / \epsilon_c \quad (2)$$

Burada  $L3_n$ , n darbe sayısındaki deplasman (mm),  $L1$ , başlangıç referans deplasmanı (mm),  $G$ , numunenin başlangıç yüksekliği (mm),  $\sigma$ , maksimum düşey gerilmedir (kPa) (Kaloush vd., 2002). Test düzeneği Şekil 6’da gösterilmiştir.

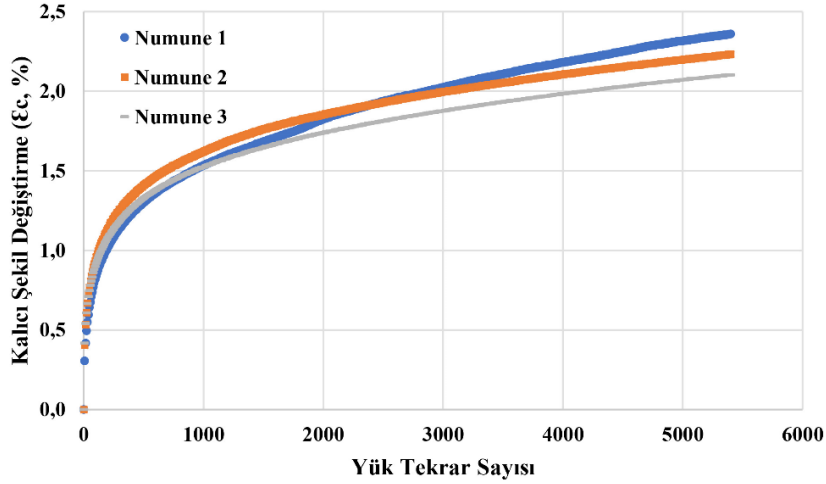


Şekil 6. Dinamik sünme deneyi düzeneği.

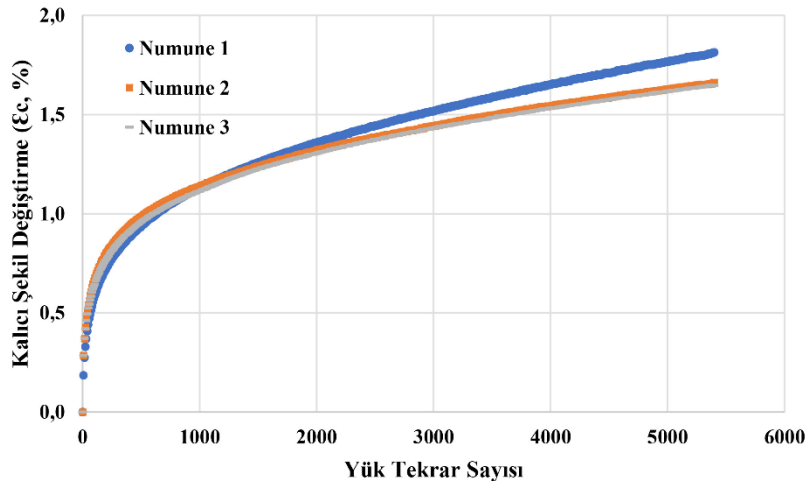
### Dinamik sünme deney sonuçları

Dinamik sünme deneyi 40°C sıcaklıkta, 500 kPa gerilme altında gerçekleştirilmiştir. Deneye başlanmadan önce numunelere 90 saniye süresince 10 kPa gerilme altında statik bir ön yükleme yapılmıştır. Yükleme periyodu 1000 milisaniye olarak alınmıştır. Bu sürenin 500 ms.'si yük etki süresi, 500 ms.'si ise dinlenme süresi olarak seçilmiştir. Her bir karışım türü için 3 adet numune hazırlanmıştır. Numuneler deneye

başlamadan önce 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Deneyde her bir numuneye 5400 darbe uygulandıktan sonra deney sonlandırılmıştır. Numunelerin  $\epsilon_c$ -yük tekrar sayısı ilişkileri Şekiller 7-14'de,  $\epsilon_c$ -yük tekrar sayısı ilişkileri Şekil 15 ve Şekil 16'da gösterilmiştir.

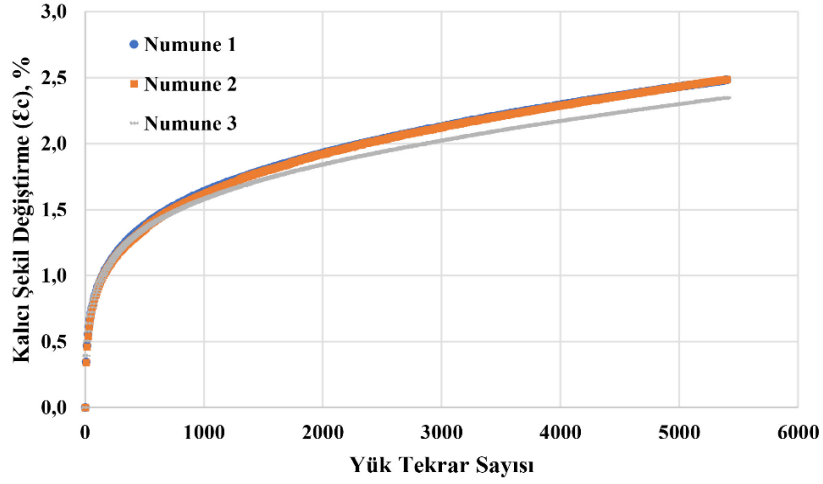


Şekil 7. Saf bitüm ile hazırlanan, kireç içermeyen numunelerin  $\epsilon_c$  -yük tekrar sayısı ilişkisi.

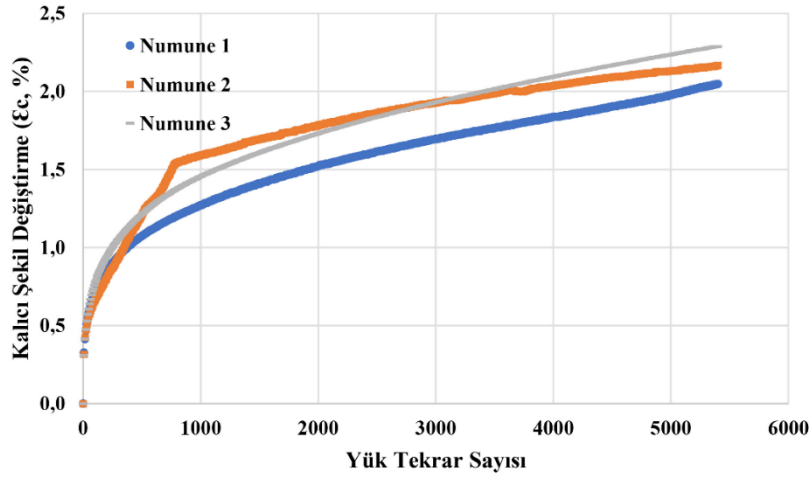


Şekil 8. Saf bitüm ile hazırlanan, kireç katkılı numunelerin  $\epsilon_c$  -yük tekrar sayısı ilişkisi

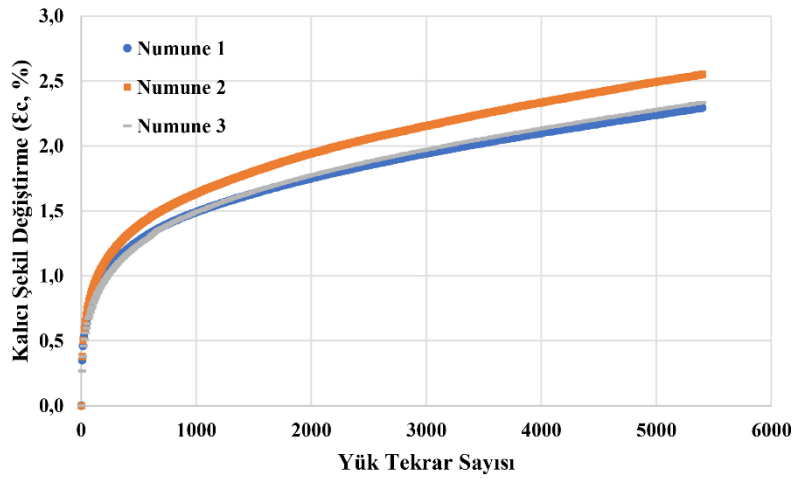




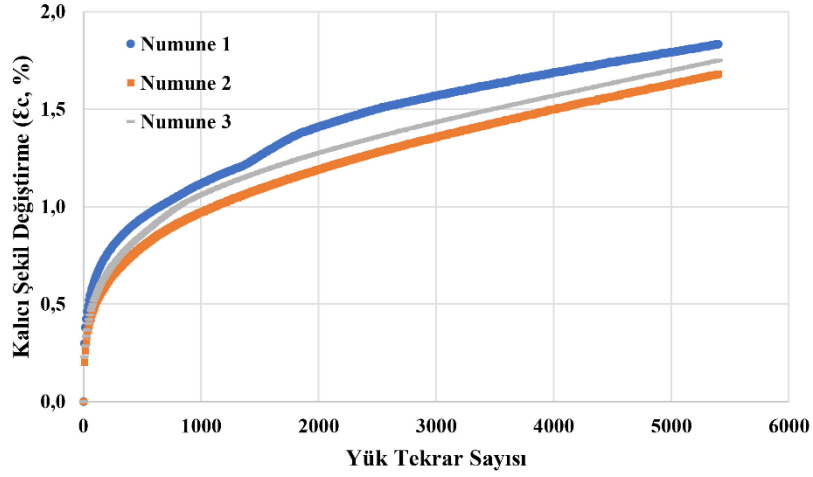
Şekil 9. Leadcap ile hazırlanan, kireç içermeyen numunelerin  $\epsilon_c$  -yük tekrar sayısı ilişkisi.



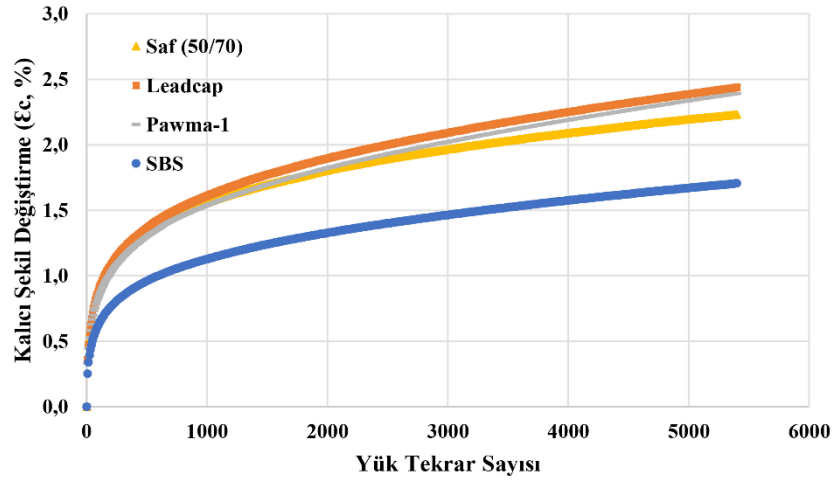
Şekil 10. Leadcap ile hazırlanan, kireç katkılı numunelerin  $\epsilon_c$  -yük tekrar sayısı ilişkisi.



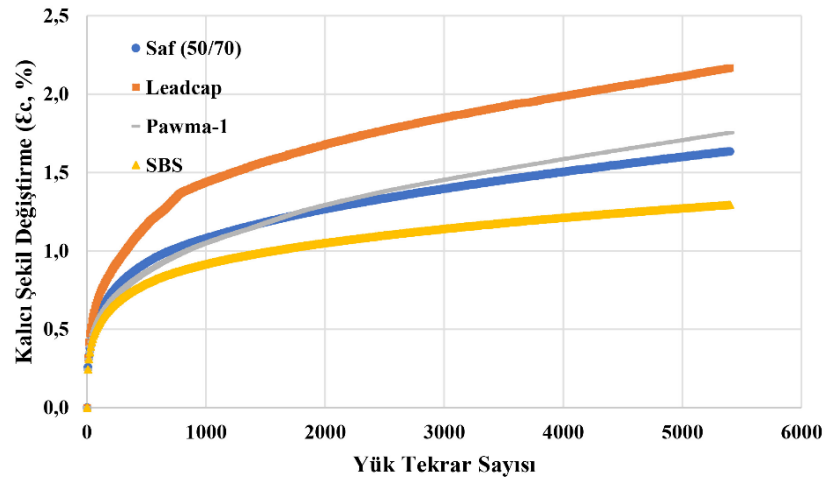
Şekil 11. Pawma-1 ile hazırlanan, kireç içermeyen numunelerin  $\epsilon_c$  -yük tekrar sayısı ilişkisi.



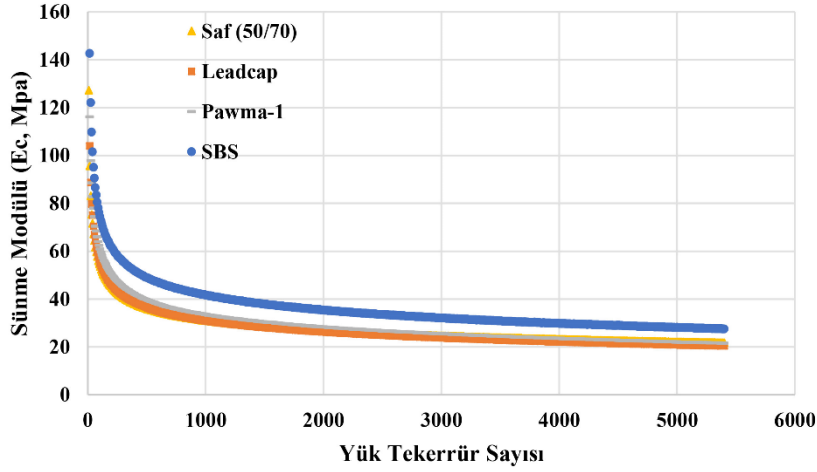
Şekil 12. Pawma-1 ile hazırlanan, kireç katkılı numunelerin  $E_c$  -yük tekrar sayısı ilişkisi.



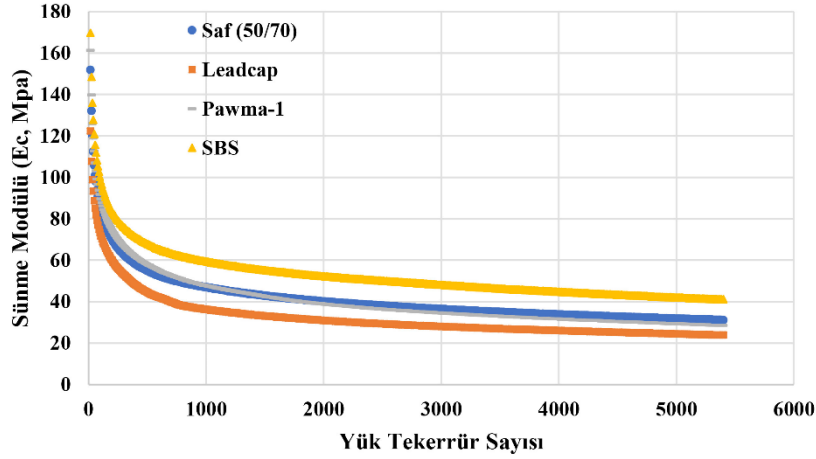
Şekil 13. Kireç içermeyen numunelerin  $E_c$  -yük tekrar sayısı ilişkisi.



Şekil 14. Kireç katkılı numunelerin  $E_c$  -yük tekrar sayısı ilişkisi.



Şekil 15. Kireç içermeyen karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi.



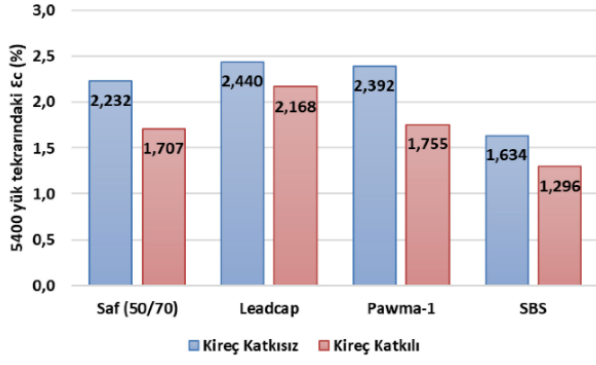
Şekil 16. Kireç katkıli karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi.

Kireç içermeyen karışımlardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, Leadcap ve Pawma-1 modifiyeli karışımlar ile kontrol numunelerinin kalıcı şekil değiştirme değerleri ve sünme modülü değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. SBS modifiyeli karışımlar en düşük kalıcı şekil değiştirme ve en yüksek sünme modülü değerlerine sahip olmuşlardır.

Kireç katkıli karışımlardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde kireç katkıli SBS modifiyeli karışımların en düşük kalıcı şekil değiştirme ve en yüksek sünme modülü değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Kireç katkıli, Pawma-1 modifiyeli ve saf karışımların kalıcı şekil değiştirmeleri ve sünme modülü değerlerinin

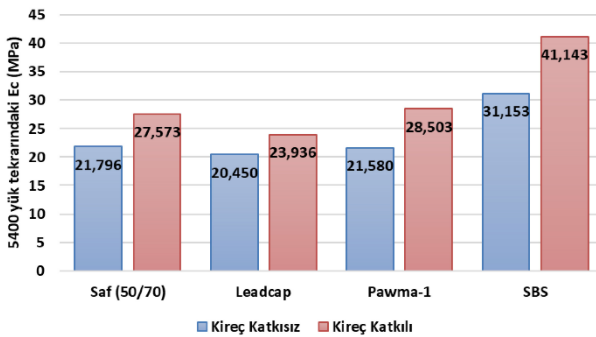
birbirine yakın olduğu görülmüştür. En büyük kalıcı şekil değiştirme ve en düşük sünme modülü değerleri kireç katkıli Leadcap modifiyeli karışımlarda görülmüştür.

Karışımların 5400 yük tekrarındaki kalıcı şekil değiştirme değerleri Şekil 17'de, sünme modülü değerleri Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 17. Karışımların 5400 yük tekrarındaki Ec değerleri

Kireç içermeyen karışımların 5400 yük tekrarındaki Ec değerleri incelendiğinde modifiye ılık karışım numunelerinin Ec değerlerinin küçük oranlarda arttığı görülmüştür. Leadcap modifiyeli karışımlarda %9.31 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %7.16 oranında Ec değerlerinin arttığı görülmüştür. SBS modifiyeli karışımlarda %26.79 oranında Ec değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kireç katkısı ile bütün karışımların 5400 yük tekrar sayısındaki Ec değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kireç katkısı ile saf karışımlarda %23.52 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %11.15 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %26.63 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %20.69 oranında Ec değerlerinin azaldığı görülmüştür. En düşük Ec değerleri kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlarda görülürken, en yüksek Ec değerleri kireç içermeyen Leadcap modifiyeli karışımlarda görülmüştür.



Şekil 18. Karışımların 5400 yük tekrarındaki Ec değerleri

Kireç içermeyen karışımların 5400 yük tekrarındaki Ec değerleri incelendiğinde ılık karışım katkılı numunelerin Ec değerlerinin küçük oranlarda azaldığı görülmüştür. Leadcap modifiyeli karışımlarda %6.17 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %0.99 oranında, Ec değerlerinin azaldığı görülmüştür. SBS modifiyeli karışımlarda %42.93 oranında Ec değerlerinin arttığı görülmüştür. Kireç katkısı ile bütün karışımların 5400 yük tekrarındaki Ec değerleri artmıştır. Kireç katkısı ile saf karışımlarda %26.5 oranında Leadcap modifiyeli karışımlarda %17.05 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %32.08 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %32.07 oranında Ec değerleri artmıştır. Kireç katkılı saf karışımların 5400 yük tekrarındaki Ec değerleri Leadcap modifiyeli karışımlardan yüksek olurken, SBS ve Pawma-1 modifiyeli karışımlardan düşük olmuştur. En yüksek Ec değerleri kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlarda görülürken, en düşük Ec değerleri kireç içermeyen Leadcap modifiyeli karışımlarda görülmüştür.

## Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada bitüm modifikasyonunda SBS, Pawma-1 ve Leadcap kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Pawma-1 ve Leadcap modifiyeli karışımlar diğer karışımlara oranla daha düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında hazırlanmış, ayrıca filler olarak %2 oranında sönmüş kireç kullanılmıştır. Hazırlanan modifiye bitümlerle optimum bitüm içeriklerinde Marshall karışım numuneleri üretilmiş ve bitümlü karışım numuneleri üzerinde dinamik sünme deneyleri uygulanmıştır.

Kireç içermeyen karışımlardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, Leadcap ve Pawma-1 modifiyeli karışımlar ile kontrol numunelerinin kalıcı şekil değiştirme değerleri ve sünme modülü değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. SBS modifiyeli karışımlar en düşük kalıcı şekil değiştirme ve en yüksek sünme modülü değerlerine sahip olmuşlardır. Kireç katkılı karışımlardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise, kireç katkılı SBS modifiyeli

karışımların en düşük kalıcı şekil değiştirme ve en yüksek sünme modülü değerlerine sahip olduğu, Pawma-1 modifiyeli ve saf karışımların kalıcı şekil değiştirmeleri ve sünme modülü değerlerinin birbirine yakın olduğu, en büyük kalıcı şekil değiştirme ve en düşük sünme modülü değerlerinin Leadcap modifiyeli karışımlarda olduğu görülmüştür.

Bütün sonuçlar incelendiğinde, sönmüş kireç katkısının bütün karışımların sünme performansını arttırdığı görülmüştür. Kireç içeren veya içermeyen, Leadcap modifiyeli karışımların sünme performanslarının, kontrol numunelerine göre küçük bir oranda azaldığı, Pawma-1 modifiyeli karışımların sünme performanslarının kontrol numunelerine oldukça yakın olduğu, SBS modifiyeli karışımların sünme performanslarının ise tüm diğer karışımlardan yüksek olduğu görülmüştür.

SBS modifiyeli karışımların en iyi sünme performansını göstermesi ve kireç katkısının bu performansı artırması çalışmanın literatürle uyumlu olduğunu göstermiştir. İlık karışımlarda kireç kullanımının sünme performansında küçük miktarlarda meydana gelen kaybı gidereceği görülmüştür. Leadcap ve Pawma-1 katkıları ile farklı oranlarda SBS katkısının birlikte kullanımının ilave çalışmalarla değerlendirilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

## Kaynaklar

Alataş, T., ve Kizirgil, M. E., (2013). The Effects of Using Styrene-Butadiene-Styrene and Fly Ash Together on The Resistance to Moisture-Induced Damage, Permanent Deformation and Fatigue of Hot Mixture Asphalt, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(5), 1030-1039.

Bueche, N., (2009). Warm Asphalt Bituminous Mixture With Regards to Energy, Emissions and Performance, *Young Researchers Seminar*, 3-5 June, Torino.

D'Angelo, J. A., Harm, E. E., Bartoszek, J. C., Baumgardner, G. L., Corrigan, M. R., Cowsert, J. E. ve Newcomb, D. E., (2008), *Warm-mix asphalt: European practice*.

İstek, A., ve Alataş, T. (2017) Farklı ılık asfalt katkılarının bitümlü bağlayıcıların mekanik özelliklerine etkisi, *International Conference on Advanced Engineering Technologies*, 840-849, Bayburt, Türkiye.

Jenks, C., Jencks, C., Harrigan, E., Adcock, M., Delaney, E., ve Freer, H., (2011). *NCHRP Report 673, A Manual for Design of Hot Mix Asphalt With Commentary*, Washington DC, Transportation Research Board of the National academies.

Johansson, L., (1995). Influence of Hydrated Lime on Bitumen Hardening, *Kth Infrastructur Och Samhaellsplanering Rapport*, 95, 8.

Kaloush, K., Witczak, M., Roque, R., Brown, S., D'Angelo, J., Marasteanu, M., ve Masad, E., (2002). Tertiary flow characteristics of asphalt mixtures, *Asphalt Paving Technology*.

Kim, H., Jeong, K.-D., Lee, M. S., ve Lee, S.J., (2014). Performance properties of CRM binders with wax warm additives, *Construction and Building Materials*, 66, 356-360.

Lesueur, D., Little, D., ve Epps, J., (1998). Effect of hydrated lime on the rheology, fracture and aging of bitumen and asphalt mixtures, *Lhoist HMA Symposium*, Dusseldorf, Germany.

Little, D. N., Epps, J. A., ve Sebaaly, P. E., (2006). Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, *National Lime Association*.

Mohammad, L., ve Abadie, G., (2000). Puppala.Mechanistic Evaluation of Hydrated Lime in HMA Mixtures, *Transportation Research Record*, 1723,1, 26-36.

Öcal, A., (2001). Tekrarlı yükleme altındaki katkılı asfalt betonunun sünme özelliklerinin belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Olard, F. ve Noan, C.L., (2007). Les Enrobés à Basse Température, 2ème Prix de la Sélection Française du Prix AIPCR, Catégorie Développement Durable, France.

Şengül, C. E., Oruç, S., İskender, E., ve Aksoy, A., (2013). Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance, *Construction and Building Materials*, 41, 777-783.

Su, K., Maekawa, R. ve Hachiya, Y., (2009). Laboratory Evaluation of WMA Mixture for Use in Airport Pavement Rehabilitation. *Construction and Building Materials*, 23,7, 2709-2714.

Uluğtekin, E., (1999). Creep properties of asphaltic concrete under repeated loading. *Yüksek Lisans Tezi*, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Xiao, F., Punith, V., ve Amirhanian, S. N., (2012). Effects of non-foaming WMA additives on asphalt binders at high performance temperatures, *Fuel*, 94, 144-155.

Yılmaz, M., Kök, B. V., (2008). Stiren-Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesinin ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23,4, 811-819.

## Investigation of creep performance of asphalt mixtures prepared with different additives

### Extended abstract

*Increased traffic density and traffic loads result in reduced performance of bituminous mixtures used in flexible pavements. Signs of deterioration on the roads are cracks, formation of tracks and loss of material on the surface. Rutting due to permanent deformation of bituminous mixtures under repetitive loads leads to shorter service life of flexible pavements. Therefore, it is of great importance to take into account the creep behavior in the flexible pavements. The loading times as a function of vehicle speeds have a direct effect on the reactions of the bituminous mixtures to the load. Factors that affect the creep behavior of bituminous mixtures need to be well understood to estimate the depth of the track. The physical creep behavior shows itself as a wheel trace and is generally seen on roads with high traffic flow and low speed.*

*In addition to improving the performance of bituminous mixtures, it is also aimed to provide energy saving in production and to reduce the harmful effects on the environment. Various technologies have been developed in the world in order to prepare low cost and less mixing temperatures of bituminous mixtures. Warm mix asphalt refers to technologies that allow mixing temperatures of bituminous mixtures to be reduced. The purpose of these technologies is to provide the necessary adherence between the aggregate and the binder by reducing the viscosity of the binder by lowering the viscosity of the binder at temperatures lower than 20°C to 55°C compared to hot mix asphalts.*

*In this study, Pawma-1 and Low Energy and Low Carbon-Dioxide Asphalt (Leadcap) warm mix asphalt additives and Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) additive were tested in mixture samples in bitumen modification. Pawma-1 was used at 0.35%, Leadcap at 1.5% and SBS at 2%. In addition, the effects of the use of the hydrated lime (2%) as fillers in the warm mix asphalts that were observed to improve some properties of the hot mix asphalts in previous studies have been investigated. Mixture samples were prepared by determining the optimum bitumen contents according to the Marshall method. Aggregate and binder material were mixed in warm*

*mixes at lower temperatures and compacted. The dynamic creep tests were applied on the bituminous mixture samples prepared in optimum bitumen contents at a temperature of 40°C and a stress level of 500 kPa. From the results obtained, it was seen that the hydrated lime additive increased the creep performance of all mixtures. Leadcap modified mixtures showed that their creep performance decreased slightly in comparison with control samples. It has been found that the creep performance of Pawma-1 modified mixtures is very close to the control samples. SBS modified mixtures were found to have higher creep performances than all other mixtures.*

**Keywords:** Warm mix asphalt, Creep, Styrene-Butadiene-Styrene, Leadcap, Pawma-1, Hydrated lime



# İklim Değişikliğinde Etkenler ile Sonuçların Birbirini Tetiklemesi

**Murat BATAN\***

Batman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batman

[murat.batan@batman.edu.tr](mailto:murat.batan@batman.edu.tr) ORCID:0000-0002-9207-4730, Tel:( 0488) 217 40 12

**Z. Fuat TOPRAK**

Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır

[toprakzf@dicle.edu.tr](mailto:toprakzf@dicle.edu.tr) ORCID:0000-0003-0876-1165 ,Tel: (0412) 248 82 17 (3538)

Geliş: 30.03.2019, Revizyon: 25.06.2019, Kabul Tarihi: 05.09.2019

## Öz

İklim değişikliği yaklaşık çeyrek asırdır birçok uzman tarafından üzerinde ciddi olarak çalışılan önemli bir problemdir. Periyodik yapılan toplantılar, ülkeler arası yapılan anlaşmalar, yayınlanan raporlar, protokol metinleri uluslararası düzeyde kapsamlı bir mevzuatı meydana getirmiştir. Konuya ilişkin çabalar iki yönlüdür. Bu çabaların bir kısmı olumsuz yönde gelişen iklim değişikliği; başka bir ifade ile küresel ısınma ile mücadele yönündedir ki bu çabalardan sonuç alınması yüzyıllarla ifade edilen uzun bir süre gerektirmektedir. Bu nedenle uluslararası toplum, bu çabalardan ikincisi olan iklim değişikliğine uyum çalışmalarını da eş zamanlı olarak yürütmektedir. Her iki çabadan da maksimum düzeyde sonuç alabilmek için iklimi etkileyen ana faktörler ile olası sonuçlarının gerçekçi bir şekilde belirlenmesi gerekir. Bu yönde yapılan çalışmalar, etkin faktörler ile sonuçların birbirini tetiklediğini göstermektedir. Bu etkenler, artan enerji ihtiyacının giderilmesi başta olmak üzere denizcilik, ormancılık, tarım ve hayvancılık gibi insan faaliyetleri olarak sıralanabilir. Bu etkenlerin tamamı aynı zamanda iklim değişikliğinden en çok etkilenen unsurlardır. Bu çalışmada, bu etkenlerin iklim değişikliğini nasıl etkilediğini literatürdeki bilimsel çalışmalardan alıntılar yapılarak gösterilmiş, aynı şekilde iklim değişiminin de bu etkenleri nasıl etkilediği gösterilmiştir. Yani bu sürecin nasıl işlediği, bilimsel çalışmalarla derlenip, yorumlar yapılmıştır. Bu çalışmanın gerek iklim değişikliğini azaltma, gerek iklim değişikliğine uyum stratejilerinin geliştirilmesi çabalarına bir nebze ışık tutması umulmaktadır.

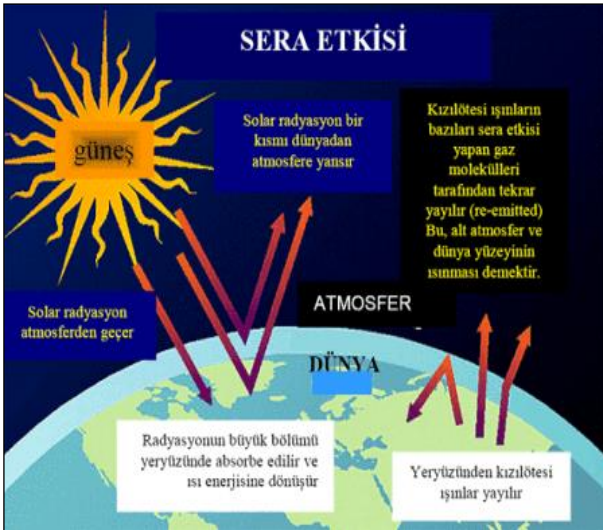
**Anahtar kelimeler:** Küresel iklim değişikliği, insan etkisi, okyanus, tarım, hayvancılık.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Küresel iklim değişikliği, birçok alanı etkilemesi sebebiyle, birçok disiplin tarafından tartışılmış, bilimsel araştırmalar yapılmış ve bu bilimsel araştırmaların ışığında uluslararası toplum da küresel iklim değişikliğini kabul etmiş, en kısa sürede gerekli tedbirlerin alınması için ciddi çalışmalar başlatmıştır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), Hükümetlerarası İklim Değişikliği Panelleri (IPCC), Kyoto Protokolü (KP), Avrupa İklim Değişikliği Programı (ECCP) bu süreçle oluşan anlaşmalar ve toplantılardır (Batan ve Toprak, 2015).

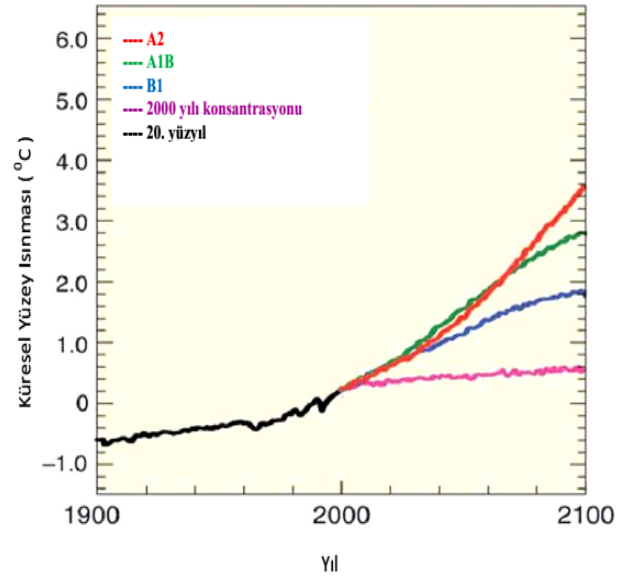
(Şekil 1.1)'de gösterildiği üzere, küresel ısınmanın nasıl gerçekleştiği sera etkisiyle açıklanmaktadır. Güneşten gelen görünür olan ışınların neredeyse onda dokuzu atmosferden geçerek yeryüzüne ulaşmaktadır. Bu ışınlar yüzeyde ısınmaya neden olmaktadır. Yeryüzü, güneş gibi ısıyı tüm dalga boylarında yayamaz; sadece kızılötesi olarak yayar. Bunun nedeni ise atmosferdeki sera gazlarının ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , CFCs,  $\text{NO}_2$  gazları, PM10, su buharı ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ve diğ.) bu ışınları soğurup, yüzeye geri yansıtmasıdır. Tekrar eden bu süreçle, yeryüzü ısınmış olur (Uslu, 2013).



Şekil 1.1. Sera etkisi (Uslu, 2013).

Yapılan araştırmalar göstermiştir ki; dünyamız, 2 °C'ye kadar olan küresel ortalama sıcaklık

artışlarını geri dönüşü olmayan zararlar oluşmadan telafi edebilir. Bunun üzerindeki küresel ortalama sıcaklıklardaki artış, çok büyük problemler ortaya çıkarmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)'de ortalama sıcaklık artışları için bazı senaryolarla öngörüler yapılmıştır. (Şekil 1.2)'de görüldüğü üzere; bunlardan en iyimser olanlara göre 2100 yılına kadar ortalama sıcaklıklar 2,7 °C, en kötümser olanlara göre de 5,8°C artacağı öngörülmektedir (IPCC, 2007). Bu kapsamda, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü ile, ortalama sıcaklıklarda 2 °C artım sınırlandırması yapmak için tedbirler alınmakta ve sera gazlarının salınımını önlemek amacıyla ekonomik yaptırımları hayata geçirmek için uğraş verilmektedir (Batan, 2014).



Şekil 1.2. Bazı senaryolara göre ortalama küresel sıcaklıklarda beklenen artışlar (Arıkan ve Özsoy, 2008).

Son yayınlanan IPCC-V (Beşinci Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) değerlendirme raporu'na göre bu sıcaklık artışlarının %99 gibi yüksek bir oranla en büyük sorumlusunun insan olduğu belirtilmiştir. İnsanoğlu çeşitli ihtiyaçlarını karşılamak için sanayi devrimi, tarım faaliyetleri ve hayvancılıkla sera gazlarının artmasına neden



olmuş, dünyamız buna karşılık olarak okyanuslar ve orman alanlarıyla bu etkiyi azaltıcı rol oynamıştır. İklim değişikliğini etkileyen bu etkenler, bu etkiyi yaparken aynı zamanda kendileri de etkilenmiştir. Bu makale ile karşılıklı etkilenmeden, kısır bir döngü oluşarak ısınmanın ve buna bağlı birçok olumsuzluğun nasıl arttığı gösterilmiştir. Bulgular kısmında iklim değişikliğini etkileyen bu en büyük 5 etken referanslar yorumlanarak ayrıntılı incelenmiştir.

## Yöntem

İklim değişikliğini etkileyen ve iklim değişiminden etkilenen etkenler olan denizcilik, hayvancılık, ormancılık, tarım gibi doğrudan insan etkenli faktörler ve doğrudan olmasa da, diğer sera gazlarının insan etkisiyle artmasıyla etkisi artan su buharı faktörü; literatürdeki bilimsel çalışmalar incelenerek ve yorumlanarak, bu etkenler ve sonuçların birbirini nasıl tetiklediği net bir şekilde ortaya konulmuştur.

Bu derleme çalışmasıyla, bu etkileşim sürecinin daha iyi anlaşılmasını sağlayarak, iklim değişikliğiyle mücadele yöntemlerinden; iklim değişikliğini azaltma ve iklim değişikliğine uyum sağlama çalışmaları kapsamında daha etkili bir yol haritası belirlenmesi amaçlanmıştır.

Aşağıda iklim değişikliği süreci ve bu sürecin karşılıklı olarak tetiklenmesinde etkili olan faktörlerle ilgili literatürden örnekler verilmiş, bulgular kısmında literatür daha detaylı incelenerek yorumlar yapılmıştır.

İklim aşırılıklarında veya doğal afetlerdeki değişimlerde, sera etkisi olan gazların atmosferdeki konsantrasyonundaki artış, insan nüfusunun dramatik bir şekilde artışıyla ve sanayileşme süreciyle birlikte fosil yakıt tüketimindeki artış arasındaki ilişkiler incelenmiş, korelasyonlar kurulmuş sonuçta tüm bu değişimlerin insan etkisiyle olabileceği ortaya çıkarılmıştır. Bununla birlikte bu tespit

IPCC-IV'te yer almış (IPCC, 2007) ve IPCC-V'te bu etkilerin %99 gibi büyük bir oranla insan etkisiyle gerçekleştiği belirtilmiştir (IPCC, 2013). Bundan sonra bu yöndeki eğilimler daha da artmıştır.

Tüm bu değişimlerden yine insanoğlu çoğunlukla olumsuz olarak etkilenmiştir. Küresel sıcaklık ortalamalarındaki artış bazı bölgelerde yağış rejimlerini değiştirmiştir (Hamidi, 2018). Bunun sonucu olarak, kuraklık yada aşırı yağışlar sonucunda birçok insan hayatını kaybetmiştir. Yine, doğrudan küresel ortalama sıcaklıklardaki artış sonucu da birçok insan hayatını kaybetmiştir.

İnsanoğlu sanayileşme süreciyle atmosferdeki CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, PM10 gibi sera gazlarının artmasına neden olmuş ve bunun sonucu olarak insanoğlu birçok solunum yolu hastalığına yakalanmıştır.

Küresel sıcaklıklardaki artış sonucu deniz seviyesindeki yükselme birçok verimli tarım arazisini yok etmiştir. Yine sıcaklıklar okyanus suyunun ısınmasına neden olarak birçok deniz canlısının ölümüne yol açmış ve sonuçta insanoğlu tüm bu olumsuzluklardan etkilenmiştir.

Aşırı sıcaklıklar orman yangınlarına neden olmakta ve ayrıca ağaçların aşırı sığağa uyum sağlayamamasından dolayı orman üst sınırı daha yukarılara çekilerek, bu durum insanoğlunun geçim kaynağını ve bazı canlıların yaşam alanını yok etmiştir. Aşırı sıcaklar bazı yararlı böcek türlerinin ölmesine ve bu sıcaklara uyum sağlayan bazı türlerin ise aşırı artmasına neden olarak tarımsal faaliyetlere zarar vermiş ve bunun sonucunda insanoğlu olumsuz yönde etkilenmiştir.

Deniz seviyesinin yükselmesi deniz suyunun karaya doğru çekilmesine neden olmuş ve tuzlu suyun tatlı yeraltı suyuna karışmasıyla insanların içme yada kullanma suyunun azalmasına neden olmuştur (Batan, 2014).

## Bulgular

### Tarımsal Faaliyetler

Bu bölümde, derleme mahiyetindeki çalışmamızın yöntemi olan; literatür incelemesiyle; iklim değişikliğinin tarımsal faaliyetleri nasıl etkilediği gösterilmiş, tarımsal faaliyetlerin de iklim değişikliğini nasıl tetiklediği literatürden örneklerle gözler önüne serilmiştir. Bu kapsamda;

İklim değişikliğiyle meydana gelen ısınmanın tarımsal faaliyetleri olumsuz etkilediği aşağıdaki ard arda verilen iki referansla desteklenmiştir:

“Sıcaklıklardaki yükselme tarımsal faaliyetleri ve bitki örtüsünü çoğu bölgede olumsuz etkileyeceği düşünülmektedir (Hamidi, 2018). İklim değişikliğinden dolayı meydana gelen bu tür olumsuzluklar bir çok ürünün yetiştirme alanını, ekim/hasat zamanını değiştirmektedir” (Batan, 2014).

Aşağıdaki iki referans; iklim değişikliğinin neden olduğu ısınmadan dolayı; buharlaşmanın artmasıyla su kaynaklarının azaldığını ve tarımsal faaliyetleri olumsuz etkilediğini göstermektedir:

“Aşırı sıcaklardan dolayı su kaynaklarının azalması, tarımda kullanılan suyun azaltılmasını gerekli kılacaktır. Ayrıca, ısınmadan dolayı buharlaşma artacak ve toprakta tuzluluk-alkalilik gibi problemler de ortaya çıkacaktır. Bu da tarımsal faaliyetleri olumsuz etkileyecektir” (Kanber ve ark., 2009).

“Sıcaklıkların artmasıyla, suyun azalmasından dolayı fotosentez yavaşlayacağı için tarım ürünlerinin yetişmesi de yavaşlayacak ve bitkiler döllenmede zorluklar yaşayacaktır. Ve bunun sonucunda birçok bitki türü yok olmaya mahkum kalacaktır” (Haşlak, 2007).

Yine aşağıda verilen referans, ısınmanın neden olduğu aşırı buharlaşmayla yağışlarda artma yaşanacağı ve bunun bazı bölgelerde tarımsal faaliyetlere olumlu yansıtılabileceği, bazı bölgelerde de topraktaki nemin azalmasıyla kuraklaşmaya neden olabileceği gösterilmiştir:

“Deniz ve okyanuslarda aşırı buharlaşmadan dolayı, atmosferde nem artacak ve bunun sonucunda yağışlarda artma yaşanacaktır. Suyun buharlaşması sert rüzgârları yaratacak ve bu sert rüzgarlar suyun topraktan buharlaşmasını artıracaktır. Buda bazı bölgelerin kuraklaşmasında etken olacaktır” (Haşlak, 2007).

Aşağıdaki referans sıcaklıkların artmasıyla buzullardaki erimenin arttığını ve deniz seviyesinde yükselmelerin olduğunu, bunun sonucunda da bir çok tarım alanının sular altında kalarak tarımsal faaliyetlerin olumsuz etkilendiğini göstermektedir:

“Buzulların erimesi deniz seviyesinde yükselmelere neden olmuş ve kıyı bölgesindeki yerleşimler etkilenerek, kıyıdaki alçak ekosistemler yerini bataklıklara bırakmıştır (Korkmaz, 2007).

“Deniz seviyesinde 1m’lik yükselmeye karşılık; Bangladeş’in %17.5’i , Hollanda’nın %6’sı ve birçok ada ve ada ülkelerinin büyük bölümünün sular altında kalması beklenmektedir. Deniz seviyesindeki yükselmenin, Amerika’da 25.000 km<sup>2</sup> 'lik toprak kaybına neden olacağı öngörülmektedir” (Korkmaz, 2007).

Aşağıdaki verilen referansta son çalışmaların iklim değişikliğinin tarımsal faaliyetler üzerinde olumlu veya olumsuz bölgesel etkileri olduğunu göstermektedir:

“Yeni çalışmaların ortaya koyduğu ve “iklimsel kimlik” olarak tanımlanan çalışmalar, iklim değişikliğinin bölgesel olarak incelenmesi gerektiğini savunmaktadır” (Toprak ve ark., 2012; Toprak ve ark., 2013). “İklim değişikliğiyle daha elverişli iklime sahip olacak

olan daha yüksek enlemlerde üretkenlik artarken, tropik ve alt tropik bölgelerde verimin azalması beklenmektedir”.

Aşağıdaki iki referans bu çalışmada savunulan tarımsal faaliyetlerin de iklim değişikliğini tetiklediğini desteklemektedir:

“Sera etkisi yaratan çevre problemlerinin %13.8’ine tarım neden olmaktadır. Tarımsal kökenli salımların %1.4’ü tarımsal enerji kullanımından karbondioksit salınımıyla, %5.2’si tarımsal amaçlı kullanılan arazilerden diazotmonoksit salınımıyla ve %5.4’ü hayvancılık ve gübrelemeden metan ve diazotmonoksit salınımıyla, %1.7’si tarımsal faaliyetlerdeki ilaçlama ve çeltik tarımı ile diazotmonoksit ve metan salınımıyla oluşmaktadır (World Resources Institute, 2005).

“Dengesizleşen ekosistem ve zirai alanlardaki organik karbon  $CH_4$  ve  $CO_2$  şeklinde atmosfere yayılmakta ve iklim değişikliğini tetiklemektedir. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki;  $CO_2$ ’den sonra küresel ısınmaya en fazla neden olan insan kaynaklı sera gazı metan gazıdır ve  $CO_2$  gazına göre 21 kat daha fazla etkili olmaktadır” (Korkmaz, 2007).

### **Su Buharı**

Bu çalışmamızın amacını destekleyen bir diğer etken de su buharıdır. Su buharı, sera gazları içerisinde en etkili olup, sera etkisinin %75’ine neden olduğu düşünülmektedir. Diğer sera gazlarından farkı, insanoğlunun su buharının atmosfere yayılmasına doğrudan müdahale edememesidir. Çünkü, su buharı atmosfere hidrolojik çevrim ile yayılır (Varınca ve ark., 2008).

Dünyanın ısınmasıyla büyük su kütlelerinden buharlaşma artacak ve atmosfere yayılan su buharı da daha çok ısınmaya neden olacaktır. Bu da gösteriyor ki; dünyanın ısınması deniz ve göl gibi büyük su kütlelerinden buharlaşan su miktarını artıracak; atmosferde artan su buharı

da daha çok sera etkisi yaratarak dünyanın ısınmasını tetikleyecektir.

İnsanlar su çevrimine ya da atmosfere yayılan su buharına doğrudan müdahale edemezler. Ancak, su buharı dışındaki diğer sera gazlarını azaltarak, dünyanın daha az ısınmasını sağlayıp, buharlaşmayı azaltabilirler. Böylece dolaylı olarak atmosfere yayılan su buharını azaltabilirler.

Su buharının sera etkisi yaparak ısınmayı tetiklemesinin yanında; buharlaşmaya neden olarak denizlerin tuzluluk oranını artıracaktır. Bu da denizler yaşayan canlıların yaşamını olumsuz etkileyecektir.

### **Hayvancılık Faaliyetleri**

İklim değişikliğinin etkilediği sektörlerden biri de hayvancılıktır. Hayvancılık, bu çalışmada vurgu yapılan iklim değişikliğini tetikleyen etkenlerden biridir aynı zamanda.

Aşağıda ard arda verilen üç referans ısınmadan etkilenen hayvancılık sektörünün sera gazları arasında çok etkili olan metan gazı yayarak ısınmayı tetiklediğini göstermektedir:

“Küresel ısınmadan etkilendiği kabul edilen hayvancılık sektörünün; Dünya’da metan salımlarının %17-25 kadarına neden olması, hayvancılık faaliyetlerinin küresel ısınmayı etkileyen bir faktör olduğunu da göstermektedir” (Demir ve Cevger, 2007).

“Sera gazlarının en önemlilerinden olan metan gazının emisyonunu artıran insan kaynaklı faaliyetlerden biri de hayvansal üretim yapan tesislerdir. Günümüzde kümes hayvancılığı, süt-et büyükbaş hayvancılığı ve süt sanayisinin yoğunlaşmasıyla, hayvansal üretim yapan işletmeler çevre kirliliğine neden olmaktadır” (Sirohi ve Michaelowa, 2004).

“Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, hayvansal üretim yapan tesislerden çıkan amonyak asit

yağmurlarına neden olmakta, metan gazı da sera etkisine neden olmaktadır” (Bauer, 1994).

Aşağıdaki referans ısınmanın hayvancılık sektörünü bazı bölgelerde olumlu etkileyebileceğini göstermektedir:

“Bazı çalışmalarla küresel ısınmanın hayvansal üretime etkisi incelenmiş, bu etkilerin mevsime ve bulunduğu yere göre değiştiği belirtilmiştir. Daha yüksek enlemler olan soğuk bölgelerde ısınmanın artması, otlak alanların artmasına neden olacak ve hayvancılık bundan olumlu etkilenecektir. Sıcaklığın yüksek olduğu daha düşük enlemlerde ise otlak alanlar ve yem bitkileri üretimi azalacağından hayvancılık bundan olumsuz etkilenecektir” (Mendelsohn, 2003).

Aşağıdaki iki referans, ısınmanın hayvancılık sektöründeki verimi düşürdüğünü ve hastalıkların arttığını göstermektedir:

“Amerikadaki bir çalışma; yazın ineklerin süt veriminde düşüş olduğunu ve besi hayvanlarındaki yem alımındaki düşüşten dolayı da ağırlıklarında azalma olduğunu göstermiştir. Aynı çalışma ile; süt ineklerinin yaz mevsimindeki gebe kalma oranlarında %36’lık bir düşüş olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, yüksek sıcaklık hayvanlarda strese neden olup, verimi azalttığı sonucuna varılmıştır” (Hahn ve ark., 1992).

“Isı artışının hayvanlar üzerindeki bir etkisi de, hayvanlarda enfeksiyon ve parazitlerin artmasıdır. Avustralya ve Yeni Zelanda’daki iklim değişikliği ile öngörülen senaryolarda kenelerin dirençlerinin artacağı ve bundan dolayı da hayvan hastalıklarında artma görülebileceği belirtilmiştir” (Sutherst, 1995).

### **Denizcilik Faaliyetleri**

Büyük su kütlelerinden buharlaşmayla iklim değişikliğini olumsuz yönde tetikleyen etkenlerden biri olan denizler; ısınmanın

etkisiyle de deniz seviyesinde yükselmeye ve deniz suyu sıcaklığında artmaya neden olarak olumsuz yönde etkilenmektedir.

Ancak, denizler birer yutak görevi de görerek, sera gazlarından olan karbondioksitin emilimini sağlayarak ısınmayı azaltıcı yönde de etki yapmaktadır.

Aşağıda verilen iki referansta artan sıcaklıkların deniz seviyesinde yükselmeye neden olduğunu göstermektedir:

IPCC raporlarında artan sıcaklıklarla buzulların eridiği ve “19. yüzyıl ortalarından bu yana ölçülen deniz seviye yükselmesi oranı, geriye dönük iki bin yıl boyunca görülen ortalama yükselme oranından büyük olduğu ve denizlerin küresel bazda ortalama seviye yükselmesinin devam edeceği” belirtilmektedir (IPCC, 2013).

Başka bir çalışmada da; “1901-2010 döneminde ortalama deniz seviyesinin 19 cm yükseldiği belirtilmiştir” [(Latif, 2010),(Bahadır ve Dikbaş, 2011),(Sarıkaya ve Çiner, 2003),(Petit ve ark., 1999)].

Aşağıdaki referans okyanuslardaki ısınma konusunda tespitler içermektedir:

IPCC raporlarında okyanus ısınmasıyla ilgili olarak; “1971-2010 arası dönemde okyanuslardaki enerjinin %90’ı geçen kısmının okyanusların ısınmasıyla ilişkili olduğu belirtilip; bu dönemde üst okyanusun (0-700 m); kesin ısındığı ve daha önceki dönem olan 1870-1971 arası dönemde ise ısınmış olabileceği” belirtilmiştir (IPCC, 2013).

Aşağıda ard arda verilen iki referans ısınmanın neden olduğu; denizlerdeki seviye yükselmesi, deniz suyu sıcaklığındaki artma, fırtına ve akıntılardaki düzensizlikler nedeniyle deniz canlılarının olumsuz etkilendiğini ya da göç etmek zorunda kaldıklarını göstermektedir:

“İklimsel ısınma deniz sularını ısıtacağı için, denizlerdeki canlılar ya değişen şartlara uyum

sağlayacaklar ya da göç edeceklerdir. Araştırmalar göstermiştir ki; tropik türlerin Süveyş kanalını geçerek Akdeniz Havzası güneyine akın ettiklerini, havzada yaşayan türlerin ise daha kuzeye gittiklerini belirlemiştir” (Boşgelmez ve ark.,1997).

“Denizlerde mercan kayalıklarının olduğu alanlar ve bu alanlardaki canlılar; denizlerdeki seviye yükselmesi, fırtınalardaki düzensizlikler, kıyısal akışlar ve sıcaklık yükselmesiyle meydana gelen asitleşme nedeniyle olumsuz etkilenmektedir (Sağlam ve ark., 2008).

Aşağıdaki referans, ısınmanın neden olduğu deniz suyu sıcaklığındaki artışın denizlerde akıntı sistemlerini etkileyerek bazı bölgelerde olumsuz etki yaratabileceğini göstermektedir:

“Bilim adamlarının öngörülerine göre; deniz suyu sıcaklığının artışı, denizlerde alttan ve üstten oluşan akıntı sistemleri arasındaki sıcaklık farkını azaltabileceği ve de fazla yağış etkisiyle denizlerde azalan tuzluluk oranı nedeniyle bu büyük akıntı sisteminin durabileceği ifade edilmiştir. Böyle bir durumda Kuzey Avrupa'nın önemli ölçüde soğuyacağı belirtilmektedir” (Batan, 2014).

Aşağıdaki referans denizlerin iklim değişikliğini azaltıcı yönde etkisinin olduğunu göstermektedir:

“İklim değişikliğinin okyanusları etkilemesinin yanında okyanuslar da karbondioksitin emilimini sağlayıp bir yutak görevi görerek iklim değişikliğini azaltıcı yönde etki eder. Okyanus asitleşmesine neden olan antropojenik karbondioksit yayılımının yaklaşık %30'u okyanuslar tarafından emilir” (Batan, 2014).

### **Ormanlık Faaliyetleri**

Küresel iklim değişikliğiyle meydana gelen ısınma; ormanlara ve orman yangınlarına etki etmekte, ormanların azalmasıyla ormanların karbondioksit emilimini yeterince yerine getirememesi nedeniyle ısınmayı tetiklemesi bu

etken faktörün de incelenmesini gerekli kılmıştır.

Aşağıda arda arda verilen dört referans iklimsel ısınmanın orman alanlarını azalttığını göstermektedir:

“Özellikle son yıllarda insanoğlunun yaptığı faaliyetlerin neden olduğu iklimsel değişiklikler, orman yangınlarının artmasına neden olmuştur. Dünyadaki toplam 4 milyar hektar ormanın yarısı 1950-1990 yılları arasında çeşitli nedenlerle yok olmuştur” (ÇOB, 2005).

Daha bölgesel bir örnek verecek olursak; “Alaska'da 2004 yılı ve 2005 yılında 10 milyon hektardan fazla orman yanıp, yok olmuştur. Bu miktar önceki 10 yıldaki toplam orman yangınlarından daha yüksektir” (Alaska Conservation Solutions, 2008).

“İstatistiksel çalışmalar göstermiştir ki, orman yangınları yağış, sıcaklık ve rüzgardan meydana gelen 3 ana bileşenden etkilenmektedir. Küresel ısınmanın sıcaklıkları artırmasıyla kuraklık artacak, yağışlar dengesizleşecek, rüzgarın şiddeti ve yönünün değişmesiyle de orman yangınlarında artış meydana geleceği tahmin edilmektedir” (Flannigan ve ark., 2000).

“Yapılan araştırmalar neticesinde Amazon yağmur ormanlarının iklim değişikliğinden etkilenecek büyük ölçüde yanıp, tahrip olmasından dolayı, daha fazla karbondioksit salınımının olacağı ve ısınmayı tetikleyeceği ortaya konulmuştur” (Loehle ve LeBlanc, 1996).

Aşağıda ard arda verilen üç referans, ormanların karbondioksit tutma özelliği ve iklimlendirme etkisine vurgu yapıp, iklim değişikliğini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir:

“Ormanlar bünyelerinde bağladıkları karbondioksiti yüzlerce yıl tutabilme özelliğine sahiptirler. Bu da ormanları diğer

ekosistemlerden üstün tutmaktadır (Asan ve ark., 2006).

(Şekil 2.1)'de görüldüğü üzere; ormanlarda odunların enerji santrallerinde yakıt olarak kullanılması sonucunda bile CO<sub>2</sub> 'nin doğaya geri dönmesi 10 yılı bulmaktadır. Bu süreler odunun kullanım alanı ve üretim süresi dikkate alındığında 3-4 asıra kadar sürebilmektedir (Asan ve ark., 2006).



Şekil 2.1. Değişik Bitkisel Ekosistemlerin Karbon Depolama Süresi (Yıl) (Asan ve ark, 2006).

Dünya ölçeğinde yıllık atmosfere 8 GT'luk karbon salınımı yapılmaktadır. Ormanlarda bu salınımın 0,75 GT'unu tutma kabiliyetine sahiptir. Çeşitli nedenlerle meydana gelen ormansızlaşma ile atmosferde 1,6 GT kadar karbon yükü oluşmaktadır (White, 2002).

Atmosferde tutulan CO<sub>2</sub>'nin 2/3'ü fosil yakıt tüketilmesinden, 1/3'ü de arazi kullanımlarının değiştirilmesinden ve ormansızlaştırma faaliyetlerinden meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca, ormanlar aşırı sıcaklıkları ılımanlaştırarak, iklimlendirme amaçlı enerji tüketiminin de azalmasına yardımcı olurlar (Batan, 2014).

Aşağıdaki iki referans iklim değişikliğiyle artan sıcaklıkların ormanları olumsuz etkilediğini göstermektedir:

“İklim değişikliğinin neden olduğu sıcaklıklardaki artma kuzey kuşaktaki ormanlarda büyüme süresinde artma ve bununla ilişkili olarak da bitkilerde daha fazla büyümeye neden olduğu belirtilmiştir. Bu büyüme bir kısım bölgelerde yangın, kuraklık ve biyo etkenlerle daha büyük olumsuzluklara neden olabilmektedir” (Beerling ve Mayle, 2006).

“İklim değişikliği, bitkilerde çiçeklenme zamanı ile dölleme üzerinde etkisi olan böceklerin bulunma zamanları arasında uyumsuzluğa neden olmakta ve bu da bitkileri olumsuz etkilemektedir” (Humphries ve ark., 2002).

## Sonuçlar

Bu çalışmada iklim değişikliğine etki eden insan faaliyetleri ile iklim değişikliğinden etkilenen alanlar güncel literatür ışığında tartışılmıştır. Bu bağlamda iklim değişikliğini önemli derecede etkileyen faktörler veya sektörler incelendiğinde; hepsinin iklim değişikliğinden etkilendiği söylenebilir. Yapılan analizler ve araştırmalar neticesinde okyanuslar ve ormanların bir yutak görevi görerek küresel ısınmayı azaltıcı, aynı zamanda tarım ve hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazlarının ise küresel ısınmayı artırıcı yönde etki ettiği anlaşılmaktadır.

Bu faktörlerin iklim değişikliği üzerindeki büyük etkisi nedeniyle ve de bu alanların kendisi de iklim değişikliğinden etkilenip bir kısır döngüye neden olduğu için üzerinde daha fazla durulması gereken alanlar olduğu söylenebilir. Ayrıca, bu etken faktörlerin olumlu ya da olumsuz etkilendiği durumlar iyi analiz edilerek iklim değişikliğine uyum kapsamında değerlendirilmesi mümkündür.

Sulama nedeniyle atmosferde daha fazla su buharının birikmesini önlemek için kapalı

(basınçlı) sulama şebekelerinin tercih ve teşvik edilmesinde yarar görülebilir.

Yine aynı endişe ile ormanlık alanların korunması amacıyla, çeşitli nedenlerle yok edilen ormanların yerine misli ile yenilerinin eklenmesinde yarar görülmektedir.

Fosil kökenli enerji kaynaklarının yerine temiz, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesi adeta bir zorunluluk haline geldiği söylenebilir.

Tarımsal faaliyetlerde (ilaçlama, hormon ve gübre kullanılması gibi) sera etkisini azaltıcı önlemlerin bir an önce alınması önem arz etmektedir.

Tüm ülkeler tarafından, yukarıda anılan sektörleri kapsayan yasa ve mevzuatlardaki gerekli değişikliklerin bir an evvel yapılması gerekmektedir.

## Kaynaklar

Arıkan Y. ve Özsoy G.,(2008). A'dan Z'ye İklim Değişikliği Başucu Rehberi, Bölgesel Çevre Merkezi, REC Türkiye.

Asan, Ü., Destan, S. ve Özkan, Y., (2006). "Küresel Isınmanın Önlenmesinde Ormanların Rolü ve Önemi. Türk Ormancılığında, Uluslararası İlereri Sürçte Acil Eyleme Dönüştürülmesi Gereken Konular", Mevzuat ve Yapılanmaya Yansımaları Sempozyumu, 22-24 Aralık 2005 231-241, Antalya.

Bahadır, M. ve Dikbaş, E.D.,(2011). "Türkiye'deki Aktüel Buzul Alanlarının CBS ve UA ile Değişim Analizi (1990-2000)", TMMOB Coğrefi Bilgi Sistemleri Kongresi, Antalya.

Batan M.,(2014). Küresel İklim Değişikliği ve Beklenen Sonuçları, Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Batan M. ve Toprak Z.F.,(2015). Küresel İklim Değişikliğinin Olumlu Etkileri ve Bu Etkilerin İklim Değişikliğine Uyum Kapsamında Değerlendirilmesi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, Cilt 6, Sayı:2, Diyarbakır.

Bauer, S., (1994). "Development of environmental impact assessment tools for livestock production systems", Volume:1, Research Report, Gießen, Germany, pp.4-16.

Beerling, D.J. and Mayle, F.E., (2006). "Contrasting effects of climate and CO<sub>2</sub> on Amazonian ecosystems since the last glacial maximum". *Global Change Biology*, 12 (10): 1977-1984.

Boşgelmez, A.; Boşgelmez, İ.; Savaşçı, S.; Paşlı, N. ve Kaynaş, S.(1997). "Ekoloji". *ISVAK*; Ankara.

Canlı, K.,(2010). Küresel Isınmanın Orman Ekosistemine Etkisi, *Mehmet Akif Ersoy Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Vol:2,Page: 86-96.

ÇOB,(2005). İklim Değişikliği Müzakere Kılavuzu Türkiye, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.

Demir, P., ve Cevger Y., (2007). "Küresel Isınma ve Hayvancılık Sektörü", *Veteriner Hekimler Derneği Dergisi*, Cilt:78, Sayı: 1.

Flannigan, M. D., Stocks, B. J. and Wotton, B. M., (2000). "Climate change and forest fires". *The Science of the Total Environment*, 262, 221-229.

Hahn, G.L. and et al., (1992). "Climate Change Impacts on Livestock Production and Management", *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, MI, USA, 16 pp.

Hamidi. N., (2018). "Temperature-Rainfall and Drought Analysis for Diyarbakir City, Turkey" *International Journal of Scientific and Technological Research*, Vol. 4 No.10, 572-582.

Haşlak O.,(2007). "Küresel Isınmanın Toprak ve Bitkiler Üzerine Etkileri", Üniversite Öğrencileri 2. Çevre Sorunları Kongresi, Fatih Üniversitesi, İstanbul.

Humphries, M.M., Thomas, D.W. and Speakman, J.R., (2002). "Climate-mediated energetic constraints on the distribution of hibernating mammals". *Nature*, 418 (6895): 313-316.

- IPCC,(2007). “Intergovernmental Panel on Climate Change, 4th Assessment Report”.
- IPCC,(2013). “Intergovernmental Panel on Climate Change, 5th Assessment Report”.
- Kanber, R., vd., (2009). “Küresel İklim Değişikliğinin Su Kaynakları ve Tarımsal Sulamaya Etkileri”, Türkiye Ziraat Mühendisliği VII. Teknik Kongresi.
- Korkmaz, K., (2007). “Küresel Isınma ve Tarımsal Uygulamalara Etkisi”, *Alatırım dergisi*, cilt no: 6(2), sayfa: 43-49.
- Latif, M., (2010). “Mini Buz Çağı Kapıda”, *Fizikist Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Yıl: 1, Sayı: 3.
- Loehle, C. and LeBlanc, D., (1996). “Model-based assessments of climate change effects on forests. *Ecological Modelling*”, 90, 1-31.
- Mendelsohn, R., (2003). “Assessing The Market Damages from Climate Change. In Griffin JM(edt.) Global Climate Change: “*The Science, Economics and Politics*”. Edward Elgar Publishing Ltd., UK.
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., and et al.,(1999). “Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica”. *Nature*, Volume 399.
- Sağlam, N.E., Düzgüneş, E. ve Balık İ., (2008). “Küresel Isınma ve İklim Değişikliği”, *Ege Üniversitesi Su Ürünleri Dergisi*, Cilt: 25, Sayı: 1, Sayfa: 89-94.
- Sarıkaya, M., A., Çiner, A.,(2003), “Erciyes Volkanı Geç Kuvaterner Buzul Çökelleri”, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, Sayı: 27, 59-74.
- Sirohi S. and Michaelowa A.,(2004). “CDM Potential of Dairy Sector in India”.
- Sutherst, R.W.,(1995). “The Potential Advance of Pest In Natural Ecosystems Under Climate Change: Implicationsfor Planning and Management. In ‘Impacts of Climate Change on Ecosystems and Species: Terrestrial Ecosystems’”. (Eds. J. Pernetta, C. Leemans, D. Elder, S. Humphrey) IUCN, Gland, Switzerland, pp: 83-98.
- Toprak, Z.F., Toprak, Ş. and Hamidi N., (2012). “Global Climate Change and Climatic Identity/ChangementClimatiqueetIdentite Climatique”.Le Journal de l’Eauet de l’EnvironnementLJEE, Revuesemestrielleinternationale scientifique et technique, Numero 20, 81–91.
- Toprak, Z.F., Hamidi, N., Toprak, S., and Sen, Z., (2013). "Climatic Identity Assessment of the Climate Change". International Journal of Global Warming, Vol. 5, No. 1, 30–45. WOS: 000315365600003.
- Varınca K.B., Güneş G. ve Ertürk F., (2008). Hava Kirleticilerinin İnsan Sağlığı ve İklim Değişikliği ÜzerineEtkileri, *Ulusal Hava Kalitesi Sempozyumu (UHAKS), Bildiriler Kitabı*, s: 161-168, Konya.
- World Resources Institute.,(2005). “Navigating the Numbers: Greenhouse Gas Data”, Washington, D.C.,s.12.
- White, R.M.,(2002). “Sequestering Carbon Emissions in the Terrestrial Biosphere”. Washington Advisory Group.
- Alaska Conservation Solutions.,(2008). “Global Warming Report”. RetrievedDecember 10.
- <http://www.alaskaconservationsolutions.com>. (Erişim Tarihi:17.06.2013).
- <http://denizuslu.wordpress.com/sera-etkisi> 2, (Erişim Tarihi:17.06.2013).
- [www.hm-treasury.gov.uk/media/014/86/273.pdf](http://www.hm-treasury.gov.uk/media/014/86/273.pdf), (ErişimTarihi: 30.03.2007)



## Factors and consequences of climate change trigger each other

### Extended abstract

*The climate change is a great problem being studied seriously on for the last three decades. Periodically performed meetings, intergovernmental agreements, the published reports and protocols' texts have constituted comprehensive international legislations, procedures, and policies. The efforts related to solving the problem can be mainly categorized in two directions. Some of these efforts intend to fight against negative aspects of climate change; in another word, aim to fight against global warming. However, in this case, obtaining the results takes more than hundred years. Thus, the second direction can be explained with adaptation to climate change. Today, both efforts are internationally carried out together. The factors effects climate change and its consequences should be correctly or realistically determined. This is vitally important to maximize the mentioned two efforts performance. The researches performed on the subject show that the factors and the consequences of climate change trigger each other. It is possible to say that all sectors are affected by climate change.*

*In this study, 5 factors that affect climate change and also affected by climate change have been emphasized. These are agricultural activities, water vapor, marine activities, livestock activities and forestry activities.*

*The deteriorated ecosystem and organic carbon in agricultural areas are spread to the atmosphere as CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> and trigger climate change. Studies have shown that; Greenhouse gas, which causes the highest global warming after CO<sub>2</sub> is methane gas and is 21 times more effective than CO<sub>2</sub> gas.*

*Water vapor is a major factor both be affected of climate and influencing the climate. Water vapor is thought to cause 75% of the greenhouse effect in the world. This situation brings up a vicious circle as well as interesting. Because the world's warming will increase evaporation from large water bodies. Water vapor spreading into the atmosphere will also cause more heating. People cannot intervene directly in the water cycle. However, evaporation will be reduced by reducing the other greenhouse*

*gases that cause heating. So, indirectly the effect of water vapor will be reduced.*

*The fact that 17-25% of methane emissions originate from the livestock sector in the world. Also shows that livestock is an important factor affecting global warming as well as being affected by global warming. Studies have shown that; In cold regions, grassland areas will increase with the effect of global warming and livestock will be affected positively, in lower latitudes where temperature is high, grassland areas and forage crops production with global warming will decrease and this will adversely affect livestock. Plants making animal production will also trigger global warming; Ammonia from plants will cause acid rains and methane gas will cause greenhouse effect.*

*High reliability determinates to sea water rise with melting of glaciers with increasing temperatures were made. Global warming will heat the sea water. Therefore, the creatures in the seas will either adapt to the changing conditions or migrate. Alongside affecting the oceans of the climate change, oceans also affect climate by providing the absorption of carbon dioxide. Approximately 30% of the anthropogenic carbon dioxide emission that causes ocean acidification is absorbed by the oceans.*

*It has been determined that; global climate change affects forests and forest fires and forests play a role in preventing carbon dioxide emissions. Drought with increasing the temperatures of global will increase. It is estimated that the increase in forest fires will occur with the change of the direction and strength of the wind.*

*In this study, the effects of these factors on climate change have been shown by making excerpts from scientific studies in the literature. Similarly, it has been shown how climate change affects these factors. In other words, how this process works has interpreted and compiled with scientific studies.*

*It is estimated that this work will shed some light on efforts to reduce climate change and to develop climate change adaptation strategies.*

**Keywords:** *Global climate change, factor of human, ocean, agriculture, ranch.*



# Optimum taşıt sayısının belirlenmesinde yapay sinir ağları ile çok değişkenli lineer regresyon tekniklerinin karşılaştırılması

**Ömer Faruk CANSIZ**

İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay  
[ofarukcansiz@iste.edu.tr](mailto:ofarukcansiz@iste.edu.tr) ORCID: 0000-0001-6857-2513, Tel: (326) 613 56 00

**Nazmi ÖZTEKİN\***

İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay  
[noztekin.mfbe18@iste.edu.tr](mailto:noztekin.mfbe18@iste.edu.tr) ORCID: 0000-0001-6118-7444 Tel: (539) 639 35 34

**İbrahim ERGİNER**

İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay  
[ibrahim.erginer.mfbe18@iste.edu.tr](mailto:ibrahim.erginer.mfbe18@iste.edu.tr) ORCID: 0000-0002-6001-3124 Tel: (555) 894 48 90

Geliş: 12.04.2019, Revizyon: 03.06.2019, Kabul Tarihi: 08.08.2019

## Öz

Toplu taşıma faaliyetinde bulunan işleticilerin, verimli ve sürdürülebilir bir yapıda olması için toplu taşıma taşıt sayısının optimum düzeyde olması gerekmektedir. Bu çalışmada, yapay zeka tekniklerinden olan yapay sinir ağları kullanılarak toplu taşıma güzergahlarında kullanılacak optimum taşıt sayısı tahmin edilmektedir. Bu çalışmada 6 adet bağımsız değişken kullanılmaktadır. Bu bağımsız değişkenler; mevcut taşıt sayısı, tur sayısı, hat uzunluğu, taşıtların günlük yaptığı toplam kilometre, günlük taşınan yolcu sayısı ve kilometre başına yolcu sayısıdır. Bağımlı değişkenimiz, optimizasyon sonrası taşıt sayısı olmak üzere bir tanedir. 16 ayrı hattan alınan verilerle, bu değişkenlerden oluşan veri seti meydana getirilmektedir. En iyi sonuçlara sahip yapay sinir ağları modeli; ileri beslemeli, Levenberg-Marquardt eğitim algoritmali, tek bir gizli katmana ve tansig transfer fonksiyonuna sahip, on adet nörona uygulanan modelde elde edilmektedir. Bu sonuçlara göre, en iyi yapay sinir ağları modelinin korelasyonu 0,92, yüzde hataların ortalaması %27,25 ve ortalama karesel hatalar 25,91 değerlerine sahip olmaktadır. Yapay sinir ağları modelinin istatistiksel metotlarla karşılaştırılması amacıyla çok değişkenli lineer regresyon modelleri oluşturulmaktadır. Bu amaçla lineer ve purequadratic regresyon çeşitleri kullanılmaktadır. Çok değişkenli lineer regresyonun lineer türlerinde, aynı bağımlı ve bağımsız değişkenler yer almaktadır. Regresyon analizleri sonucunda lineer regresyon modelinin korelasyonu 0,97, yüzde hataların ortalaması % 24,45 ve ortalama karesel hatalar 4,14 çıkmaktadır. Purequadratic regresyon modelinde ise korelasyon 0,99, yüzde hataların ortalaması %7,32 ve ortalama karesel hatalar değeri 0,08 olarak hesaplanmaktadır. Purequadratic regresyon yöntemi kullanılarak oluşturulan model yapay sinir ağları ve çok değişkenli lineer regresyon modeline göre daha iyi sonuç vermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Toplu Taşıma; Optimum Taşıt Sayısı; Yapay Sinir Ağlar; Regresyon Analizi

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI: 10.24012/dumf.553228

## Giriş

Ülkemizde her geçen gün toplu taşıma sistemlerine olan ihtiyaç artmaktadır. Bu ihtiyacın karşılanması için toplu taşıma sistemlerinin bir birine entegre olması ve yüksek verimle çalışması gerekmektedir. Ülkemizde birçok toplu taşıma sistemi bulunmaktadır. Lastik tekerlekli toplu taşıma sistemleri ülkemizde ki en yaygın toplu taşıma sistemlerinin başında gelmektedir. İlk yatırım maliyetlerinin diğer toplu taşıma sistemlerine göre düşük olması ve vatandaşların erişim kolaylığı açısından en kolay şekilde ulaşması, lastik tekerlekli toplu taşıma sisteminin gelişiminde çok önemli rol oynamaktadır. Bu gelişim kontrolsüz ve ihtiyaçtan fazla olması durumunda;

- Çevre kirliliği, (karbon salınımının fazla olması)
- Gürültü kirliliği,
- Hatların verimsizleşmesi,
- Oluşan verimsiz hatlardan dolayı esnafın para kazanmaması ve ücret tarifelerinin yükselmesi,
- Ücret tarifelerinin yüksek olması sebebiyle vatandaşların bireysel taşıt kullanımına yönelmesi, gibi durumlarla karşılaşılmaması söz konusudur.

Hatay İlinde başlatılan toplu taşıma rehabilitasyon çalışmaları kapsamında bu ve buna benzer bir çok problem tespit edilmekte ve gerekli düzenlemeler yapılmaktadır. Toplu taşıma rehabilitasyon çalışmalarının tamamlanması ile birlikte;

- Çevre kirliliğinin azaltılması,
- Gürültü kirliliğinin azaltılması,
- Hatların daha verimli hale getirilmesi,
- Toplu taşıma sisteminin bir biri içerisinde entegre olması,
- Ücret politikalarının yeniden düzenlenmesi,
- Bireysel taşıt kullanımı azaltılarak toplu taşıma kullanım oranının yükseltilmesi

- Toplu taşıma hizmeti almayan yerlere toplu taşıma hizmeti sağlanması,
- 65 yaş ve üstü vatandaşlar ile %40 ve üstü engelli vatandaşlarımızın toplu taşıma sisteminden ücretsiz yararlanması amaçlanmaktadır.

Tolon ve Tosunoğlu (2008) tarafından yapılan çalışmada; tüketici tatmini için yapay sinir ağları ve regresyon metotları birbiri ile karşılaştırılmaktadır. Yapılan analiz sonuçlarında, yapay sinir ağlarının regresyon metotlarına göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Cansız ve arkadaşları (2009) tarafından yapılan çalışmada; trafik kazalarında meydana gelen ölümlerin sayısını belirlemek için yapay sinir ağları kullanılmaktadır. Kazalarla ilgili analizlerin yapılabilmesi için değişkenler belirlenerek veri seti oluşturulmaktadır. Belirlenen değişkenler sayesinde yapay sinir ağı modeli oluşturulmaktadır. En iyi modeli elde etmek için farklı transfer fonksiyonlarına, farklı nöron sayısına ve farklı eğitim algoritmalarına sahip çeşitli yapay sinir ağı modelleri tasarlanmaktadır. On dört nöron, tansig transfer fonksiyonu ve Levenberg-Marquardt eğitim algoritması ile oluşturulan model, eğitim ve test verilerine en iyi uyumu sağlamaktadır. Sonuç olarak yapay sinir ağı modelinin trafik kazalarında ölümleri tahmin etmede uygun bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

Bora (2009) tarafından yapılan çalışmalarda, Denizli ilçesinde otobüs firmasından sağlanan Nisan 2008 ile Nisan 2009 arasındaki otobüsle toplu taşımacılıkla ilgili veriler toplanarak verilerin analizi yapılmaktadır. Nisan 2008 ile Nisan 2009 arasındaki yolcu başına getiriler ile taşınan yolcu sayıları kullanılarak 24 ay boyunca yolcu başına getiri tahminleri ile taşınabilecek yolcu sayıları bulunmaya çalışılarak model oluşturulmaktadır. Bu model sayesinde toplu taşımacılık sisteminin cazibesi artırılarak daha fazla yolcu taşınması amaçlanmaktadır. Modelin katsayıları belirlenirken En Küçük Kareler (EKK) yöntemi

ve “Çözücü” programı kullanılmaktadır. Oluşturulan model kullanılarak dört adet senaryo üretilmektedir. Daha sonra senaryolar kendi aralarında değerlendirilmektedir. Taşınabilecek yolcu sayısı üzerinde yolcu başına getirilerin doğrudan etkisi vardır. Bu yüzden uygulanacak bilet ücretlerindeki artış oranlarının makul düzeyde tutulması gerekmektedir. Böylece, otobüsle toplu taşımacılık sisteminin cazibesi artırılarak daha fazla yolcu taşınabilir ve daha fazla gelir elde edilebilir.

Cansız (2011) tarafından yapılan çalışmalarda; SmeedDenklemler'deki nüfus değişkeni, sürücü sayısı ile değiştirilmektedir. Araç sayısı ve sürücü sayısı olan en iyi YSA modeli 19 nöron, tan-sig transfer fonksiyonu ve Levenberg-Marquardt eğitim algoritmasına sahip olan modeldir. Sonuç olarak, sürücü değişkeni sayısının popülasyonla yer değiştirmesi, taşıt kazalarında ölenlerin sayısının tahmin edilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu çalışma, önerilen modellerin doğruluğu ile ölü tahmin sayısına göre nüfus yerine sürücü sayısının artırılabilirliğini göstermiştir. Ayrıca, YSA ve loglineer regresyon yöntemlerine göre yüksek bir korelasyon katsayısı ve düşük bir MSE ile trafik kazalarında ölü sayısını tahmin etmek için YSA modelleri kullanılabilir.

Kalpı (2013) tarafından yapılan çalışmalarda; İzmir'de mevcut durumda birçok toplu taşıma aracı faaliyet göstermektedir. Toplu taşıma araçlarının bir birine entegrasyonu gün geçtikçe daha büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma İzmir'de ulaşım sektörünün zaman içerisinde değişimini ele almaktadır. Yapılan çalışmalarda birtakım öneriler sunulmuş ve toplu taşıma hizmetlerinin daha verimli kullanılması amaçlanmaktadır.

Cansız ve Easa (2011) tarafından yapılan çalışmalarda; yapay sinir ağ yöntemleri kullanılarak dikey eğrilerle kombine edilmiş yatay tanjantlarda çarpışma sıklığını tahmin etmektedir. Çalışmada yapay sinir ağları modelleri ve regresyon yöntemleri birbiri ile karşılaştırılmış olup yapay sinir ağlarının en

düşük ortalama kare hata değerine sahip olduğunu tespit edilmiştir. Sonuç olarak yapay sinir ağları, çarpışma sıklığını tahmin etmek için istatistiksel modellerden daha iyi istatistiksel performansla sahiptir. Analiz sonuçlarına göre yapay sinir ağları modelleri, 3 boyutlu hizalama elemanlarının yatay teğetler üzerindeki etkilerini değerlendirmek için önerilmektedir.

Cansız ve Askar (2018) tarafından yapılan çalışmalarda; ülkemizde yük ve yolcu taşımacılığının büyük bir kısmı asfalt yollarda gerçekleştirilmektedir. Asfalt yolların önemi her geçen gün artmakla beraber yolların tasarımında en önemli konulardan biri olan bitüm yüzdesinin belirlenmesidir. Bu çalışmada bitüm yüzdesinin belirlenmesinde Marshall Stabilite testi ve Çoklu Doğrusal Regresyon yöntemleri karşılaştırılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda en yüksek performans değerine sahip modelin altı değişken modelden oluştuğu görülmektedir. En iyi modelin R (korelasyon) değeri 0,571'dir. En iyi modelin MSE (ortalama hata) değeri 14841,81'dir. En iyi modelin MPE (ortalama yüzde hata) değeri 9.58'dir.

Cansız ve Polat (2018) tarafından yapılan çalışmalarda; şehirlerimizin gelişimi ile nüfus yoğunluğu artmış, bu nedenle kentteki trafik yoğunluğunun artmasıyla birlikte birçok sorun ortaya çıkmış ve daha önce yapılmış olan hatalı teknik altyapı ile planlanmamış mevcut ulaşım sistemleri cevap verememektedir. Hatay İlinde ulaşım standartlarının artırılması ve meydana gelen trafik problemlerinin çözülmesi amacıyla, toplu taşıma sistemindeki mevcut güzergâh yapılarını, araç tiplerini ve seyahat analizlerini değerlendirmek ve gelişen kentsel yapının olumlu ve olumsuz noktalarını değerlendirerek bunları etkin ve sürdürülebilir bir yapıya dönüştürmektir.

Üneş ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan çalışmalarda; dört farklı analiz yöntemi kullanılarak Millers Ferry Barajı'nın rezervuar seviyesinin tahmini yapılmaktadır. Çalışmada yapay sinir ağı, multi regresyon, otoregresif ve hareketli ortalama otoregresif analizleri

yapılarak hangi analiz sonucunun daha iyi sonuçlar verdiği karşılaştırılmaktadır. Çalışmalar sonucunda en iyi sonuçları yapay sinir ağları vermektedir. En iyi modelin korelasyonu 0.893 ve ortalama karesel hatalar değeri 0.0032 olmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda yapay sinir ağlarının diğer metotlara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Üneş ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan çalışmalarda; nehirlerde asılı tortu miktarını belirlemek için dört farklı analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar yapay sinir ağları analizi, M5Tree, çok değişkenli lineer regresyon analizi ve sediment derecelendirme eğrileri kullanılmaktadır. En iyi analiz sonuçlarını yapay sinir ağları vermekte olup, korelasyon değeri 0,890, ortalama karesel hatalar değeri 45242,93 olmaktadır. Tortu miktarının tahminini belirlemek için yapay sinir ağlarının diğer metotlara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Doğan ve Özuysal (2017) tarafından yapılan çalışmada; toplu taşıma araçlarında bekleme süresini incelemektedir. Bireysel araç kullanımındaki artışın önüne geçmek için, toplu taşıma araçlarını daha cazip hale getirmek gerekmektedir. Bekleme süresinin azaltılması ile birlikte toplu taşıma kullanımının artması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada 13 durakta bekleme süreleri ile alakalı gözlemler yapılmaktadır. Duraklar kendi içerisinde 6 farklı kategoriye ayrılmış ve buna göre değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda durak bilgilendirme sisteminin yaklaşık olarak 2 dakika süreyi kısalttığı görülmektedir.

Demirci ve arkadaşları (2018) tarafından yapılan çalışmalarda; yeraltı su seviyesinin etkin kullanımı ile alakalı çalışmalar yapılmaktadır. Çalışmada; yer altı su seviyesi, yağış ve sıcaklık değişkenleri kullanılarak yeraltı su seviyesindeki dalgalanmalar incelenmektedir. Günlük yağış, sıcaklık ve yeraltı suyu seviyesine ilişkin bilgiler yapay sinir ağları ve çok değişkenli lineer regresyon analizlerinde bağımsız değişken olarak kullanılmaktadır.

Yapay sinir ağları ve lineer regresyon analiz sonuçları bir biri ile karşılaştırıldığında; sonuçlar arasında büyük farklar bulunmasada lineer regresyon analizleri daha iyi sonuçlar vermektedir. Lineer regresyon analizlerinin korelasyonu 0,996 ortalama karesel hatalar değeri 0,04 olmaktadır.

Toplu taşıma rehabilitasyon çalışmalarında, optimum taşıt sayısı belirlenirken yapay sinir ağları ve çok değişkenli lineer regresyon tekniklerinden de yararlanılmaktadır. Bu metotlar kullanılırken bağımsız değişkenlerin yer aldığı veri seti hazırlanmaktadır. Hazırlanan veri seti sayesinde optimum taşıt sayıları hesap edilerek, taşıt sayısının kontrolsüz bir şekilde artmasının önüne geçilmektedir. Bu sayede verimsizliğin önüne geçilerek sürdürülebilir kurumsal bir yapı oluşturulması planlanmaktadır. Yapılan bu çalışma ile toplu taşıma araç sayısının kontrolsüz bir şekilde artmasının önüne geçilmesi planlanmaktadır. Kontrolsüz bir şekilde araç sayısının artmasının önüne geçilmesiyle birlikte;

- Çevre kirliliğinin azalması,
- Trafik yoğunluğunun azalması,
- Toplu taşıma hatlarında güzergâh planlamalarının daha sistematik ve kolay yapılabilmesi,
- Planlanan güzergâhlarla birlikte bireysel araç kullanımının önüne geçilmesi,
- İlk yatırım ve işletme giderlerinin azalması öngörülmektedir.

Yukarıda da sıralanan maddelerde de görüldüğü gibi bu tip çalışmalar çok büyük önem arz etmektedir. Gün geçtikçe kullanımı artan yapay sinir ağlarının optimum taşıt sayısının tespit edilmesinde, çok değişkenli lineer regresyon yöntemleri ile kıyaslanmıştır.

Analizler sonucunda optimum taşıt sayısının belirlenmesinde çok değişkenli lineer regresyon modellerinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

## Materyal ve Yöntem

### Veri Toplama

Bu çalışma, Hatay ilinde Üniversite-Serinyol ve Harbiye Bölgelerinde toplu taşıma faaliyeti

gösteren işleticileri kapsamaktadır. Toplu taşıma rehabilitasyon çalışmalarında mevcut toplu taşıma sistemindeki optimum taşıt sayısının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Optimum taşıt sayılarını belirlemek için hatların günlük yolculuk sayıları, hat uzunlukları, tur süreleri, hatların pik saatte tek yöndeki maksimum yolcu sayıları ve bölgenin coğrafi yapısının belirlenmesi gerekmektedir.

Taşıt sayıları belirlenirken maliyet hesapları yapılarak hatlarda hangi ebatlarda taşıtlarının çalışacağı maliyet hesapları sonrasında netlik kazanmaktadır. Günlük yolcu sayısı yüksek olan hatlarda yolcu taşıma kapasitesi düşük taşıtların çalıştırılması durumunda hatlarda verimsizlik meydana gelmektedir.

Oluşan verimsizlikleri sıralayacak olursak;

- Taşıt sayısının fazla olmasıyla birlikte ilk yatırım maliyetlerindeki artış,
- Bakım onarım giderlerinde artış,
- Amortisman giderlerinde artış,
- Personel giderlerinde artış,
- Akaryakıt giderlerinde artışa sebebiyet vermektedir.

Yukarıda belirtilen durumların önüne geçebilmek adına hattın yolcu potansiyeline uygun taşıt ebatlarının seçilmesi oldukça önem arz etmektedir. Oluşabilecek verimsizlikleri ortadan kaldırmak için her hatta ayrı ayrı yolcu sayımları yapılmaktadır.

Yolcu sayımları yapılmadan önce sayım ekiplerine ofis ortamında sayım formları düzenlenmektedir.

Sayım formlarında gün içerisinde çalışan taşıt sayısı, sefere başlama saati, seferin bitiş saati, gün içerisinde yapılan tur sayısı, hat uzunluğu, tur süresi, tur başına yolcu, ortalama ticari hız, taşıt başına taşınan yolcu sayısı, taşıt başına yapılan kilometre değeri, günlük yolcu sayıları vb. değerler yer almaktadır. Bu bilgiler sahada yapılan çalışmalar sonucunda titizlikle doldurularak veri seti oluşturulmaktadır.

Yapılan sayım sonuçları sonunda hatların saat saat yolcu sayımlarını gösteren grafikler oluşturulmakta ve en yoğun saat dilimindeki yolcu sayısı belirlenmektedir. Taşıt sayısı hesabı yapılırken, günün en yoğun saat diliminde ki yolcu yoğunluğu dikkate alınarak

hesaplanmalıdır. En yoğun saat dilimindeki yolcu sayısının taşınabildiği taşıt sayısı optimum taşıt sayımız olmaktadır. Yolculuğun zirve olduğu saatteki yoğunluğu kaldıracak taşıtlar, daha az yoğun saat dilimlerinde sıkıntı yaşamadan toplu taşıma hizmetine devam edebilmektedir.

Sayım sonucunda elde edilen veriler kullanılarak yapay zekâ tekniklerinden olan yapay sinir ağları yöntemine göre Matlab programında modeller oluşturulmaktadır. Bu modeller çok değişkenli lineer regresyon yöntemleri ile karşılaştırılmaktadır. Bu çalışmada yapay sinir ağı modeli olarak; ileri beslemeli, Levenberg-Marquardt eğitim algoritmasına sahip model kullanılmaktadır. Modelleri karşılaştırma kriterlerimiz korelasyon katsayısı (R), ortalama yüzde hata (OYH) ve ortalama karesel hatalar (OKH) olmaktadır. Yapılan analizler sonucunda; çok değişkenli lineer regresyon metodlarından olan, purequadratic regresyon yöntemi kullanılarak oluşturulan model, yapay sinir ağları ve lineer regresyon modeline göre daha iyi sonuç vermektedir. Yapılan analizler sırasında üç modelde de girdi verileri olarak;

- Mevcut taşıt sayısı,
- Günlük yapılan tur sayısı,
- Hat uzunluğu,
- Günlük yapılan toplam kilometre değeri,
- Günlük taşınan yolcu sayısı,
- Kilometre başına taşınan yolcu sayıları kullanılmaktadır.

Çıktı değeri olarak, optimizasyon sonrasında hatlarda çalışacak yeni taşıt sayıları kullanılmaktadır

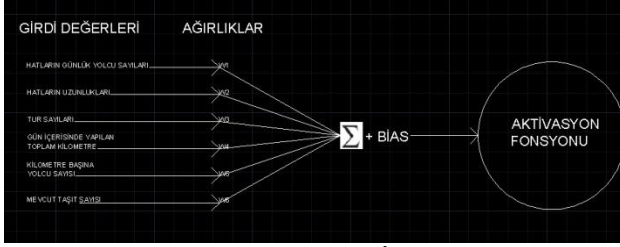
### Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağı, insan beyninin çalışma ve düşünebilme yeteneğinden yararlanılarak oluşturulan bir bilgisayar programıdır. Yapay sinir ağları sayesinde karmaşık olan problemlere kolayca çözümler sunulmaktadır. Toplu taşıma rehabilitasyon çalışmaları sırasında hazırlanan veri seti yapay sinir ağlarında analize tabi tutulmakta ve olumlu sonuçlar alınmaktadır. Optimum araç sayısı için istenilen sonuçlar elde edilene kadar deneme yanılma yöntemiyle

analizler yapılarak en doğru sonuçlara ulaşıla bilinmektedir.

Yapay Sinir Ağları Analiz Formülü

$$y=f\left(\sum_{i=1}^N x_i * w_i + b_i\right)$$



Şekil 1. Nöron İşleyiş Yapısı

## Regresyon

Regresyon; bir ve birden fazla değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan metottur. Regresyon analizleri tek ve çok değişkenli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

**Tek Değişkenli Regresyon Analizi:** Bir bağımlı ve bir bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi inceler.

**Çok Değişkenli Regresyon Analizi:** Birden fazla bağımsız değişkenin bir biri ile olan ilişkisini inceler.

Toplu taşıma optimizasyon çalışmalarında çok değişkenli regresyon analizi kullanılmaktadır. On altı ayrı hattan alınan altı bağımsız değişken doğrultusunda veri seti oluşturulmakta ve optimum araç sayısını tespiti için analizler yapılmaktadır.

Lineer Regresyon Analiz Formülü

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_3 * x_3 + \beta_4 * x_4 + \beta_5 * x_5$$

Purequadratic Regresyon Analiz Formülü

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_3 * x_3 + \beta_4 * x_4 + \beta_5 * x_5 + \beta_6 * x_1^2 + \beta_7 * x_2^2 + \beta_8 * x_3^2 + \beta_9 * x_4^2 + \beta_{10} * x_5^2$$

## Uygulama ve Başarımlar

### Taşıt Sayıları

Hatay Büyükşehir Belediyesi envanterlerinde Harbiye ve Üniversite Serinyol Bölgesinde 15 kooperatife ait 585 adet taşıtla toplu taşıma hizmeti verilmektedir. Kooperatiflerin her birinin taşıt sayıları Tablo 1’de belirtilmektedir.

Harbiye ve Üniversite Serinyol Bölgesinde toplu taşıma faaliyetinde bulunan taşıtları incelerken belediye envanterinden yararlanılmaktadır. Belediye envanterlerden; hatta çalışan taşıt sayıları, taşıtların yaşları, marka model bilgilerine ve kapasitelerine ulaşılmaktadır. Harbiye ve Üniversite-Serinyol Bölgesinde 15 toplu taşıma kooperatifine ait 16 hatta 14+1 kişi ile 21+1 kişi arası yolcu taşıma kapasitesine sahip 585 adet toplu taşıma aracı çalıştırılmaktadır.

Mevcut durumda faaliyet gösteren 585 adet toplu taşıma aracı 39 gün boyunca 501 sefer sayılarak yolculuk verileri oluşturulmaktadır. Hangi hatlarda kaç gün ve kaç sefer sayım yapıldığı detaylı olarak Tablo 2’de belirtilmektedir. Sayım sonuçlarında hatların uzunlukları, tur sayıları, günlük yapılan toplam kilometre değerleri, yolcu sayıları ve kilometre başına yolcu değerleri de Tablo 3’te belirtilmektedir.

Bu verilerden yola çıkarak günlük yolcu sayısı, günlük yapılan toplam kilometre, tur sayıları ve kilometre başına yolcu sayısı gibi veriler taşıt ve yolcu sayımları sonucunda oluşmaktadır.

Tablo 1. Mevcut Durumda Harbiye ve Üniversite-Serinyol Bölgesinde Faaliyet Gösteren Taşıt Sayısı

HATLAR	MEVCUT TAŞIT SAYISI
Serinyol	69
Alahan	13
Özat	100
Anayazı	14
Dikmece	8
Ovakent	14
Karaali	9
Yukarı Harbiye	145
Aşağı Harbiye	25
Döver	19
Sinanlı	25
Balıklidere	9
Gümüştöze	85
Bahçeköy	15
Dursunlu	12
Değirmenyolu	23
TOPLAM	585

Tablo 2.Hatlar da Sayım Yapılan Gün ve Sefer Sayıları

HATLAR	Sayım yapılan gün sayısı	Sayılan sefer sayısı
Serinyol	5	67
Alahan	2	20
Özat	2	22
Anayazı	2	17
Dikmece	2	17
Ovakent	2	59
Karaali	2	22
Yukarı Harbiye	2	29
Aşağı Harbiye	2	23
Döver	5	55
Sinanlı	2	24
Balıklidere	5	68
Gümüştöze	2	29
Bahçeköy	1	12
Dursunlu	2	23
Değirmenyolu	1	14
TOPLAM	39	501

Tablo 3.Hatlar da Sayım Yapılan Gün ve Sefer Sayıları

HATLAR	Hatların Günlük Yolcu Sayıları	Hattın Uzunluğu km (Gidiş+Dönüş)	Tur Sayısı	Hatta Gün İçinde Yapılan Toplam Km	Kilometre Başına Yolcu Sayısı
Serinyol	10819	43,04	215	9254	1,17
Alahan	2132	38,06	51	1941	1,1
Özat	11331	37,2	313	11644	0,97
Anayazı	1748	36,24	76	2754	0,63
Dikmece	480	25,83	24	620	0,77
Ovakent	406	46,04	24	1105	0,37
Karaali	568	27,36	22	602	0,94
Yukarı Harbiye	8094	27,81	268	7453	1,09
Aşağı Harbiye	1092	29,01	40	1160	0,94
Döver	557	32,09	23	738	0,75
Sinanlı	456	39,83	24	956	0,48



Balıklidere	437	38,65	23	889	0,49
Gümüşgöze	5538	30,53	195	5953	0,93
Bahçeköy	438	28,39	27	767	0,57
Dursunlu	538	18,71	28	524	1,03
Değirmenyolu	618	28,67	34	975	0,63
<b>TOPLAM</b>	<b>45252</b>		<b>1387</b>	<b>47334</b>	<b>0,96</b>

16 ayrı hattan alınan ve 6 adet bağımsız değişkenden oluşturulan veri seti ile tek gizli katmana, 10 adet nörona, tansig transfer fonksiyonuna, Levenvberg-Marquardt eğitim algoritmasına sahip olan model en iyi sonuçları vermektedir. Yapay sinir ağları analiz sonuçlarına göre olması gereken taşıt sayısı yaklaşık olarak 145 çıkmaktadır. Ortalama karesel hatalar değeri %25,91 olup, yüzde hata değeri 27,25'tir. Korelasyon değeri ise 0,92 olarak bulunmaktadır.

Lineer regresyon analiz sonuçlarına göre olması gereken taşıt 126 çıkmaktadır. Ortalama karesel hatalar değeri % 4,14 olup, yüzde hata değeri 24,45'tir. Korelasyon değeri ise 0,97 olarak bulunmaktadır.

Purequadratic regresyon analiz sonuçlarına göre olması gereken taşıt 126 çıkmaktadır. Ortalama karesel hatalar değeri % 0,08 olup, yüzde hata değeri 7,31'dir. Korelasyon değeri ise 0,99 olarak bulunmaktadır. Yapay sinir ağları analiz sonuçları Tablo 4'te lineer regresyon analiz sonuçları Tablo 5'te purequadratic regresyon analiz sonuçları ise Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 7'de ise analiz sonuçları birbiri ile kıyaslanmaktadır.

YSA ve regresyon analizlerinde, genellikle YSA analizleri daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada ki YSA analiz sonuçları iyi olmasına rağmen çok değişkenli lineer regresyon yöntemlerinden olan purequadratic regresyon modeline göre daha kötü sonuçlar elde edilmektedir. Böyle bir sonucun ortaya çıkabilmesi için, purequadratic regresyon modelinin, bağımsız değişkenlerle çok iyi uyum içerisinde olması gerekmektedir. En iyi YSA modelinin bulunabilmesi için; 3000'den fazla YSA modeli oluşturulmuş, farklı eğitim algoritmaları, farklı transfer fonksiyonları, farklı nöron sayıları ve buna bağlı olarak farklı ağırlıklar denemiştir. Buna rağmen YSA modellerinde, çok değişkenli lineer regresyon modelinin purequadratic regresyon analizlerinde elde edilen sonuca ulaşamamıştır.

**Tablo 4.** Yapay Sinir Ağları Analiz Sonuçları

HATLAR	Optimizasyon Sonrası Taşıt Sayısı (Gerçek Değerler)	YSA Sonuçları Göre Yeni Değerler	Farklar	Farkların Kareleri	Yüzde Hata Değerleri (%)
Serinyol	23	32,9829	-9,98	99,66	43,4
Alahan	4	4,667	-0,67	0,44	16,68
Özat	33	32,9876	0,01	0	0,04
Anayazı	4	3,5742	0,43	0,18	10,65
Dikmece	2	2,1342	-0,13	0,02	6,71
Ovakent	2	2,9038	-0,9	0,82	45,19
Karaali	2	2,0148	-0,01	0	0,74
Yukarı Harbiye	16	33	-17	289	106,25
Aşağı Harbiye	7	2,8423	4,16	17,29	59,4
Döver	4	2,3853	1,61	2,61	40,37
Sinanlı	4	3,217	0,78	0,61	19,58
Balıklidere	3	2,7112	0,29	0,08	9,63
Gümüşgöze	12	12,1225	-0,12	0,02	1,02
Bahçeköy	3	3,0253	-0,03	0	0,84
Dursunlu	3	2	1	1	33,33
Değirmenyolu	4	2,3121	1,69	2,85	42,2

**Tablo 5.** Lineer Regresyon Analiz Sonuçları

HATLAR	Optimizasyon Sonrası Taşıt Sayısı	Lineer Analizine Göre Yeni Değerler	Farklar Lineer	Farkların Kareleri	Yüzde Hata Değerleri
Serinyol	23	24,46137	-1,46	2,14	6,35
Alahan	4	4,580082	-0,58	0,34	14,5
Özat	33	29,01452	3,99	15,88	12,08
Anayazı	4	6,146539	-2,15	4,61	53,66
Dikmece	2	3,168182	-1,17	1,36	58,41
Ovakent	2	2,513869	-0,51	0,26	25,69
Karaali	2	2,296902	-0,3	0,09	14,85
Yukarı Harbiye	16	16,16614	-0,17	0,03	1,04
Aşağı Harbiye	7	2,966163	4,03	16,27	57,63
Döver	4	2,460716	1,54	2,37	38,48
Sinanlı	4	2,511691	1,49	2,22	37,21
Balıklidere	3	2,986477	0,01	0	0,45
Gümüşgöze	12	16,50221	-4,5	20,27	37,52
Bahçeköy	3	3,648076	-0,65	0,42	21,6
Dursunlu	3	2,858307	0,14	0,02	4,72
Değirmenyolu	4	3,718753	0,28	0,08	7,03

**Tablo 6.** Purequadratic Regresyon Analiz Sonuçları

HATLAR	Optimizasyon Sonrası Taşıt Sayısı	Puerquadratic Analizine Göre Yeni Değerler	Farklar	Farkların Kareleri	Yüzde Hata Değerleri
Serinyol	23	22,999	0,001	0	0,006
Alahan	4	3,996	0,004	0	0,111
Özat	33	32,997	0,003	0	0,01
Anayazı	4	3,949	0,051	0,003	1,281
Dikmece	2	2,165	-0,165	0,027	8,236
Ovakent	2	2,463	-0,463	0,215	23,17
Karaali	2	2,482	-0,482	0,232	24,087
Yukarı Harbiye	16	15,996	0,004	0	0,027
Aşağı Harbiye	7	7,027	-0,027	0,001	0,389
Döver	4	3,804	0,196	0,038	4,89
Sinanlı	4	3,783	0,217	0,047	5,434
Balıklidere	3	2,285	0,715	0,511	23,831
Gümüşgöze	12	12,024	-0,024	0,001	0,203
Bahçeköy	3	3,296	-0,296	0,088	9,879
Dursunlu	3	2,62	0,38	0,144	12,656
Değirmenyolu	4	4,114	-0,114	0,013	2,86

**Tablo 7.** Analiz Sonuçlarının Karşılaştırması

	Yapay Sinir Ağları Analiz Sonuçları	Lineer Regresyon Analiz Sonuçları	Purequadratic Regresyon Analiz Sonuçları
Ortalama Karesel Hatalar Değerleri	25,91	4,14	0,08
Yüzde Hata Değerleri	0,2725	0,2445	0,0731
Korelasyon Değerleri	0,92	0,97	0,99

## Sonuçlar ve Tartışma

Harbiye ve Üniversite Serinyol Bölgesinde, toplu taşıma hatlarının optimizasyonu için öncelikle mevcut durumun verileri toplanmaktadır. Daha sonra mevcut durumun analizleri yapılarak rehabilitasyon önerileri geliştirilmektedir. Mevcut durumda toplu taşıma faaliyetinde 585 taşıt bulunmaktadır. Mevcut durumda, yolcu taşıma kapasitesi yüksek hatlarda düşük yolcu taşıma kapasiteli taşıtların çalıştırıldığı tespit edilmektedir. Kullanılan taşıt kapasiteleri 14+1 ile 21+1 arasında değişmektedir.

Mevcut durumdaki işleticiler 585 adet aracın bakım onarım, amortisman, yakıt, personel, bağ kur vb. giderlerini öderken, dönüşüm sonrasında taşıt sayısı yaklaşık olarak %78,47 azalarak 126 araca düşmekte ve esnaf açısından büyük bir verimlilik elde edilmektedir.

Toplu taşıma hizmetinin verimli ve sürdürülebilir yapıda olması için taşıt sayısının optimum düzeyde olması gerekmektedir. Yapay sinir ağları kullanılarak toplu taşımacılık yapılan güzergahlarda kullanılan optimum taşıt sayısı tahmin edilmektedir. Bu amaçla 6 adet bağımsız değişken kullanılmaktadır.

Bu bağımsız değişkenlerimiz; mevcut taşıt sayısı, tur sayısı, hat uzunluğu, taşıtların günlük yaptığı toplam kilometre, günlük taşımanın yolcu sayısı ve kilometre başına yolcu sayısıdır.

Bağımlı değişkenimiz, optimizasyon sonrası taşıt sayısı olmak üzere bir tanedir. 16 ayrı hattan alınan verilerle, veri seti oluşturulmaktadır. Toplu taşıma rehabilitasyon çalışmaları sırasında hazırlanan veri seti yapay sinir ağlarında analize tabi tutularak, optimum araç sayısı için istenilen sonuçlar elde edilene kadar deneme yanılma yöntemiyle analizler yapılarak en doğru sonuçlara ulaşıla bilinmektedir.

Eğitim sonucunda; tek gizli katmana, 10 adet nörona, tansig transfer fonksiyonuna, Levenberg-Marquardt eğitim algoritmasına sahip olan model yapay sinir ağlarında en iyi sonuçları vermektedir.

Bu sonuçlara göre, en iyi yapay sinir ağı modeli;

- Korelasyonu 0,92
- Yüzde hataların ortalaması %27,25
- Ortalama karesel hatalar değeri 25,91 olmaktadır.

Yapay sinir ağları modelinin istatistiksel metotlarla karşılaştırılması amacıyla çok değişkenli lineer regresyon modelleri oluşturulmaktadır. Bu amaçla lineer ve purequadratic regresyon modelleri kullanılmaktadır.

Çok değişkenli lineer regresyon yöntemlerinin modellerinde, aynı bağımlı ve bağımsız değişkenler yer almaktadır.

Lineer regresyon analizleri sonucunda;

- Lineer regresyon modelinin korelasyonu 0,97,
- Yüzde hataların ortalaması % 24,45
- Ortalama karesel hatalar 4,14 olmaktadır.

Purequadratic regresyon analiz sonuçlarında ise;

- Korelasyon 0,99,
- Yüzde hataların ortalaması %7,32
- Ortalama karesel hatalar değeri 0,08 olarak hesaplanmaktadır.

Bu sonuçlara göre toplu taşıma rehabilitasyon çalışmalarında purequadratic regresyon yöntemi kullanılarak oluşturulan model yapay sinir ağları ve çok değişkenli lineer regresyon modeline göre daha iyi sonuç vermektedir.

Yapılan bu çalışmada optimum araç sayısının tespit edilmesiyle birlikte;

- Çevre kirliliğinin azaltılması,
- Gürültü kirliliğinin azaltılması,
- Trafik yoğunluğunun azalması,
- Hatların daha verimli hale getirilmesi,
- Ücret politikalarının yeniden düzenlenmesi,
- Toplu taşıma hatlarında güzergâh planlamalarının daha sistematik ve kolay yapılabilmesi,

- Planlanan yeni güzergâhlarla birlikte bireysel araç kullanımının önüne geçilmesi,
- İlk yatırım giderlerinin azalması,
- Bakım onarım giderlerinin azalması,
- Amortisman giderlerinin azalması,
- Personel giderlerinin azalması,
- Akaryakıt giderlerinin azalması öngörülmektedir.

## Kaynaklar

- Bora, A.Y., 'Kent içi otobüs taşımacılığında talep tahmini', Eylül 2009, 70 sayfa
- Cansız, Ö.F., Çalışıcı, M., Miroğlu, M.M., 'Use of artificial neural network to estimate number of persons fatally injured in motor vehicle accidents', World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Mathematics, Simulation, Modelling, Circuits, Systems and Signals, sayfa:136-142 (2009/12/29)
- Cansız, O. F. (2011). Improvements in estimating a fatal accidents model formed by an artificial neural network. *Simulation*, 87(6), 512-522.
- Cansız, Ö.F., Easa, S.M., 'International Journal of Engineering and Applied Sciences 7:1 2011'
- Cansız, Ö.F., Askar, D.D., 'International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS) [Vol-5, Issue-6, Jun- 2018]' <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.5.6.10> ISSN: 2349-6495(P) | 2456-1908(O)
- Cansız, Ö.F., Polat, M.İ., 'International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS) [Vol-5, Issue-5, May- 2018]' <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.5.5.13> ISSN: 2349-6495(P) | 2456-1908(O),
- Demirci, M., Üneş, F., Bahadrlı, Z. M., Taşar, B., Varçin, H., & Kaya, Y. Z. Determination of Groundwater Level Fluctuations by Artificial Neural Networks.
- Doğan, G., & Özuysal, M. (2017). Toplu ulaşımda bekleme süresini etkileyen faktörlerin incelenmesi: güvenilirlik, yolcu bilgilendirme sistemi ve fiziksel koşullar. *İMO Teknik Dergi*, 28(3), 7927-7954.
- Kalpıkcı, A., (2013). 'Ara toplu taşıma sistemlerinin şehir içi otobüs sistemleri ile entegrasyonu, İzmir Örneği' Temmuz 2013, 171 sayfa
- Tolon, M., Tosunoğlu, N.G., 'Tüketici tatmin verilerinin analizi', Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 10 / 2 (2008). 247-259
- Üneş, F., Demirci, M., & Kişi, Ö. (2015). Prediction of millers ferry dam reservoir level in usa using artificial neural network. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 59(3), 309-318.
- Üneş, F., & Demirci, M., Taşar, B., Kaya, Y. Z., Varçin, H., Üneş, F., & Demirci, M. (2017). Forecasting of suspended sediment in rivers using artificial neural networks approach. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 4(12).

## Comparison of artificial neural networks and multi-variable linear regression techniques in determination of the number of optimum vehicles

### Extended abstract

The need for public transportation systems is increasing day by day in our country. In order to meet the need of public transportation, public transportation systems should be integrated and work in high efficiency. There are many public transportation systems in our country. Tire wheeled public transportation systems are the most common public transportation systems in our country. The fact that the initial investment costs are low compared to other public transportation systems and the easiest access of the citizens in terms of accessibility, plays a very important role in the development of the tire wheeled public transportation system. The number of public transport vehicles should be at the optimum level in order to ensure that the public transport facilities are efficient and sustainable. In this study, the number of optimum vehicles to be used in public transportation routes is estimated by using artificial neural networks which are artificial intelligence techniques. For this purpose, 6 independent variables are used. These independent variables are current vehicle number, number of laps, line length, total mileage per day, number of passengers carried per day and number of passengers per kilometer. The dependent variable is the number of vehicles after optimization. With the data obtained from 16 different lines, the data set consisting of these variables is formed. The Levenberg-Marquardt training algorithm was applied to ten neurons with a hidden layer and the tansig transfer function. This model gives the best results. According to these results, the correlation coefficient of the best artificial neural network model is 0,92, the mean of the percent errors is 27,25% and the mean square error is 25,91. In order to compare the artificial neural network model with statistical methods, multivariable linear regression models are formed. linear and purequadratic regression types are used for this purpose. The models of multivariable linear regression methods have the same dependent and independent variables. As a result of regression analysis, the correlation coefficient of linear regression model is 0.97, the mean of percent error is 24.45% and the mean square error is 4.14. In the

Pure quadratic regression model, the correlation coefficient is 0.99, the mean of percent error is 7.32% and the mean square error is 0.08. Pure quadratic regression model is better than artificial neural networks and linear type of multivariable linear regression model. Based on the results obtained, it is also possible to predict the needs of vehicles in the future. With the estimation of the need for vehicles, there will be no need to purchase excess vehicles. In other words, the initial investment cost is thought to decrease. Another importance of the optimal number of vehicles indicates that there will be no more vehicles in the field. The most important advantages of this situation are reduction of traffic density, environmental and noise pollution. In addition, due to the lack of surplus vehicles, the initial investment and operating costs will be less, so the wage policies will be prevented to increase.

With the re-determination of wage policies in public transport vehicles, it is aimed to increase the use of public transportation. In the future, further studies should be developed and other parameters affecting the optimum number of vehicles should be taken into consideration.

**Keywords:** Public transportation, Number of optimum vehicle, Artificial neural networks, Analysis of regression



# Eğitim Binalarının Aydınlatma Performansı Açısından Değerlendirilmesi

**İrem BAYRAM**

Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir

[irem.bayram@ege.edu.tr](mailto:irem.bayram@ege.edu.tr) ORCID: 0000-0001-9630-2422, Tel: (232) 311 51 97

**Özge AKBOĞA KALE\***

Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir

[ozge.akboga@ege.edu.tr](mailto:ozge.akboga@ege.edu.tr) ORCID: 0000-0002-3848-0578, Tel: (232) 311 51 64

**Selim BARADAN**

Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir

[selim.baradan@ege.edu.tr](mailto:selim.baradan@ege.edu.tr) ORCID: 0000-0002-9172-8552, Tel: (232) 311 51 70

Geliş: 26.04.2019, Revizyon: 01.07.2019, Kabul Tarihi: 02.07.2019

## Öz

Aydınlatma, görsel konforu etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Eğitim binalarında doğru aydınlatma sisteminin seçilmesi öğrenci ve eğitmenin performansını olumlu bir şekilde etkilerken; yanlış aydınlatma göz kuruması, göz yaşarması, bulanık görme, göz yorgunluğu ve baş ağrısına sebep olmaktadır. Bu çalışmada Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği bölüm binası ve bina eklentisi olan bölüm laboratuvarındaki aydınlatma koşulları kullanıcı sağlığı açısından incelenmiştir. Çalışma kapsamında iç ortam aydınlık düzeyi, aydınlatma türleri ve önemi kullanıcı sağlığı açısından ele alınmıştır. 2015-2016 öğretim yılı bahar dönemi ve 2016-2017 öğretim yılı güz dönemi içerisinde Lüxmetre cihazı kullanılarak derslikler, konferans salonu, çalışma salonu, bilgisayar odası, teknik çizim dersliği, merdiven, koridor ve laboratuvarlar olmak üzere toplamda 14 farklı iç mekânda aydınlık düzeyi ölçümü yapılmıştır. Doğal aydınlatma, yapay aydınlatma ve doğal ile yapay aydınlatma aydınlık düzeyleri ölçülmüş ve ölçüm sonuçları TS EN 12464-1 Standardı ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı katlarda ve yönlerde yer alan derslikler için günün değişik saatlerindeki, yılın farklı aylarındaki aydınlık değerleri irdelenmiş ve eksikliklerin düzeltilmesi için öneriler sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Doğal Aydınlatma; Yapay Aydınlatma; Aydınlık Düzeyi; Kullanıcı Sağlığı.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Eğitim binalarının en önemli fiziksel mekânı olan derslikler, insanların ilkokuldan üniversiteye kadar yaşamlarının büyük bir bölümünü geçirdikleri mekanlardır. Eğitim süresi içinde okuma ve yazma gibi görsel işlevlerin olduğu bu alanlarda görsel konfor koşullarının sağlanması büyük önem taşımaktadır (Köknel Yener vd., 2009). Özellikle görsel algılamanın öğrenmeye olan etkisi oldukça fazladır (Winterbottom ve Wilkins, 2009). Öğrenmenin kolay gerçekleşmesinin görsel konforun sağlanmasına bağlı olduğu bilinmektedir (Bostancı Başkan ve Şerefhanoglu Sözen, 2006). Eğitimin odak noktası olan öğrencilerin göz sağlığının korunması, akademik performanslarının artırılması ve psikolojik açıdan ortamlarından hoşnut olabilmeleri için görsel konfor koşullarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Köknel Yener vd. 2009).

Görsel konforu oluşturabilmenin en önemli unsuru aydınlatmadır. Doğru aydınlatma seçimi ile öğrenme daha teşvik edici bir hal alabilmektedir (Anon, 2000). Aydınlatmanın amacı iç hacim içerisinde yeterli aydınlık düzeyini sağlamaktır (Yener vd., 2009). Derslik, ofis, toplantı salonu ve laboratuvar gibi farklı işlevlerde ve boyutlardaki mekânların bulunduğu üniversite yapılarında doğru aydınlık düzeyinin olması ile kullanıcıların herhangi bir yorgunluk ve görsel rahatsızlık olmadan ortamı algılamaları ve eylemlerini etkin bir şekilde gerçekleştirmeleri sağlanır (Capeluto, 2003).

Mekanlardaki aydınlatma düzeyi doğal aydınlatma (günüşiği) ya da yapay aydınlatma kaynakları ile sağlanmaktadır (Sirel, 1992; Şerefhanoglu, 1992). Özellikle gün boyu kullanılan yapılarda aydınlık düzeyinin doğal aydınlatma ile sağlanabilmesi hem aydınlatma için kullanılan hem de doğal ısı kazancı sağlayarak ısıtma için kullanılacak enerji tüketimini düşürecektir (Güvenkaya ve Küçükdoğan, 2009; Leslie, 2003; Kruger ve Dorigo 2008). Enerji açısından dışa bağımlı olan

ülkemizde enerjiyi etkin kullanabilme açısından kullanılan binaların aydınlatma düzeylerinin belirlenmesi, doğal aydınlatma performanslarının değerlendirilmesi, görsel konfor koşullarının iyileştirilebilmesi için yapılacak çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenlerle gerçekleştirilen çalışma, Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölüm binası ve laboratuvarlarında yürütülmüştür. Çalışmanın amacı üniversite binasında kullanılan mekanların doğal ve yapay aydınlatma kaynaklarıyla sağlanan aydınlık düzeylerini farklı dönem ve saatlerde yapılan ölçümlere göre incelemek ve iyileştirme önerileri sunmaktır.

**Eğitim Yapıları için Aydınlatma Standartları**  
Yurtdışında ve yurtiçinde aydınlatma üzerine hükümler içeren pek çok standart ve yönetmelik bulunmaktadır. Aydınlatma standartları genellikle aydınlık düzeyini baz almaktadır. Aydınlık düzeyi “bir yüzeyin, bir noktasını çevreleyen sonsuz küçük bir parçacığının aldığı akının, bu yüzey parçacığının alanına bölümü” olarak tanımlanmaktadır ve birimi lux (lx)’tur (Sirel, 1997). Türkiye’deki aydınlatma açısından eğitim yapılarını da kapsayan en geniş standart “TS EN 12464-1: Çalışma Alanlarının Aydınlatılması Standardı”dır (TS EN 12464-1, 2013). Bu Standart, kapalı alan çalışma yerlerindeki kişiler için normal göze ait kapasiteye sahip kişilerin görsel rahatlık ve performans ihtiyaçlarını karşılayan aydınlatma kurallarını kapsar. Standarda göre belirlenen minimum aydınlık düzeyi değerleri Tablo 1’de gösterilmektedir.

Global bazda bakılacak olursa özellikle Avustralya ve Yeni Zelanda’nın birlikte hazırladığı standartlar kullanılması gereken aydınlık düzeyi değerlerini net olarak ifade ettiği için dünya çapında kabul görmektedir. Eğitim tesisleri ile ilgili olan kısımda aydınlık düzeyleri sınıflar için 240 lux, ofisler için 320 lux ve koridorlar için 80 lux olarak tanımlanmıştır (AS/NZS 1680.2.3, 2008). İngiltere standardında önerilen minimum aydınlık düzeyleri ofisler için 300 lux; amfi ve laboratuvarlar için 500 lux, giriş holü için 200 lux ve koridor gibi sirkülasyon

alanları için 100 lux'tür (CIBSE, 2002). Almanya'da kullanılan aydınlatma standardı incelendiğinde ise mekânda gerçekleştirilen eylemin zorluğuna göre farklı aydınlık düzey aralıkları tanımlandığı görülmektedir. Kolay gerçekleştirilebilecek bir eylem için minimum 60-120 lux, normal zorlukta bir eylem için 250-500 lux, zor bir eylem için ise 750-1000 lux aydınlık düzeyleri sağlanmalıdır (DIN 5034-4 standardı, 1994).

**Tablo 1.** Farklı mekanlara ait minimum aydınlık düzeyi değerleri (TS EN 12464-1, 2013)

Aydınlatılacak Yer	Minimum Aydınlık Düzeyi (lux)
Sınıflar, özel ders odaları	300
Akşam dersleri ve yetişkin eğitimi için sınıflar	500
Konferans Salonu	500
Sanat odaları	500
Teknik çizim odaları	750
Uygulama odaları ve laboratuvarlar	500
Bilgisayar uygulama odaları	300
Holler	200
Dolaşım alanları, koridorlar	100
Merdivenler	150
Öğrencilerin ortak kullandığı odalar	200

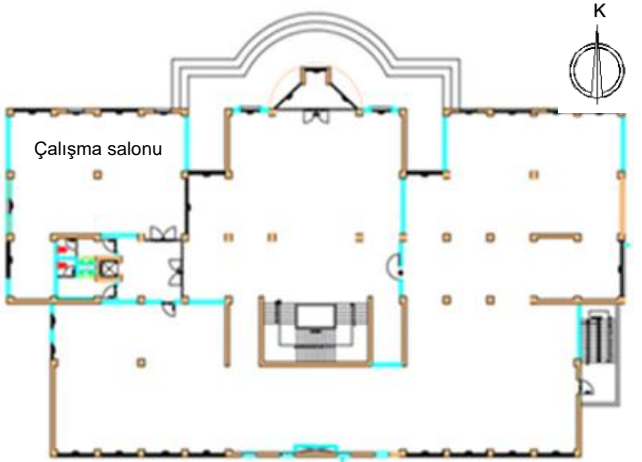
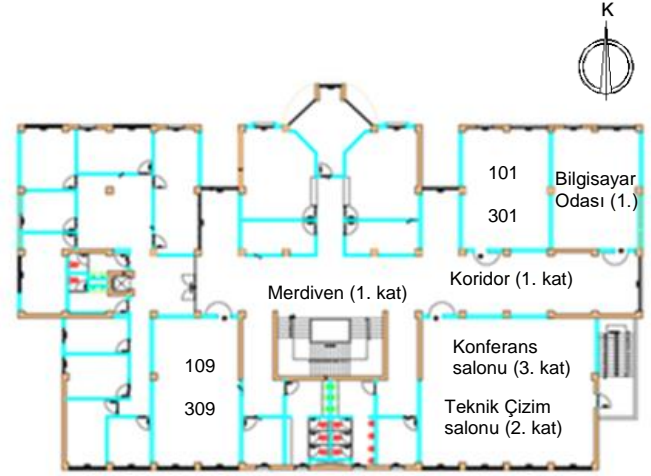
## Materyal ve Yöntem

### Alan Tanıtımı

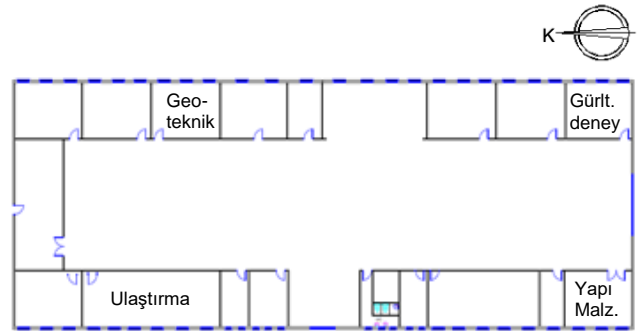
Alan çalışması İzmir ilinde bulunan Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm binası ve laboratuvarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Laboratuvar binası bölüm binasının hemen yan tarafında yer almaktadır. İnşaat Mühendisliği Bölüm binasının ön cephesi kuzey yönüne bakmaktadır. Yaklaşık 4308 m<sup>2</sup> kullanım alanına sahip olan yapı, zemin ve 3 kattan oluşmaktadır. Çalışma salonu ve hidrolik laboratuvarı binanın zemin katında, derslikler ve öğretim üyelerine ait odalar 1., 2. ve 3. katlarda yer almaktadır. Laboratuvar binası yaklaşık 1570 m<sup>2</sup> kullanım alanına sahiptir ve ön cephesi doğu yönüne bakmaktadır. Ana binanın zemin kat ve normal kat planı Şekil 2'de laboratuvar binasının kat planı ise Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 1. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölüm binası



Şekil 2. Bölüm ana binası zemin kat (altta) ve normal kat planı (üstte)



Şekil 3. Laboratuvar binası kat planı



Genel aydınlık düzeyini tespit etmek amacıyla farklı katlarda bulunan, farklı yönlere bakan ve farklı amaçlarla kullanılan mekânlar seçilmiştir. Bu mekanlar; derslikler, konferans salonu, çalışma salonu, bilgisayar odası, teknik çizim salonu, merdiven, koridor ve laboratuvarlardır. Dersliklerin çoğu LED panel armatürler (600 x 600 mm) ile aydınlatılmaktadır. Bu armatürler 30.000 saat kullanım ömrüne sahiptir ve 4000 lm/m<sup>2</sup> sıcak beyaz ışık yaymaktadır. Laboratuvarlar ve bazı dersliklerde ise 60 x 60 cm sıva üstü dördü floresan armatür grubu kullanılmaktadır. Bu armatür türü toplamda 4200 lm/m<sup>2</sup> ışık yaymaktadır.

Alan çalışması için seçilen her bir mekân farklı özelliklere sahiptir. TS EN 12464-1 Standardında farklı aydınlık düzeyi değerlerine sahip konferans salonu, bilgisayar odası, teknik çizim salonu ve çalışma salonu gibi mekanlar bu çalışma için özellikle seçilmiştir. Konferans salonu üçüncü katta bulunmaktadır ve 143,3 m<sup>2</sup> taban alanına sahiptir. Güney yönüne bakan salon tek duvar yüzeyinde bulunan 25,8 m<sup>2</sup> alana sahip pencereler ile günışığı almaktadır. Konferans salonu LED panellerle aydınlatılmaktadır ve panel armatür sayısı 17'dir. Teknik çizim salonu; ikinci katta, konferans salonunun olduğu alt katında yer almaktadır. Her iki mekânın taban ve pencere alanı aynıdır, aydınlatma armatürü sayısı eşittir. Öğrencilerin sosyal alanı olarak kullanılan çalışma salonu zemin katta yer almaktadır ve alanı 118 m<sup>2</sup>'dir. Salon kuzey ve batı yönünde yer alan 20,1 m<sup>2</sup> pencere alanına sahiptir. Salonda 14 floresan armatür grubu bulunmaktadır. Bilgisayar odası birinci katta kuzey yöne bakmaktadır ve toplam 56,2 m<sup>2</sup> taban alanına sahiptir. Kuzey cephesinde 8,8 m<sup>2</sup> pencere alanı bulunmaktadır ve 15 adet floresan armatür grubu ile aydınlatılmaktadır.

Aydınlık düzeyindeki değişimi inceleyebilmek amacıyla farklı yönlere bakan ve farklı katlarda yer alan derslikler seçilmiştir. Birinci katta ve üçüncü katta yer alan kuzey ve güneye yönelmiş 4 farklı derslik çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Bu dersliklerden ilki birinci katta bulunan 101 numaralı kuzeye bakan dersliktir. 101 numaralı dersliğin taban alanı 56,4

m<sup>2</sup> iken kuzey cephede yer alan pencere alanı 8,8 m<sup>2</sup>'dir. Seçilen 301 numaralı derslik, üçüncü katta yer almaktadır ve alan açısından 101 numaralı derslik ile birebir aynı özelliklere sahiptir. 101 numaralı derslikte 6 adet LED panel armatür bulunurken 301'de 10 adet floresan armatür grubu bulunmaktadır. Güney yönündeki aydınlık performansını değerlendirebilmek için 1. ve 3. katlarda yer alan 109 ve 309 numaralı derslikler seçilmiştir. Her iki derslik de 70,1 m<sup>2</sup> taban alanına sahiptir ve güney cephede bulunan 12,9 m<sup>2</sup> alana sahip pencereler ile aydınlatılmaktadır. 309 numaralı derslikte 7 adet LED panel armatür bulunurken 109 numaralı derslikte bu sayı 8'dir.








Koridorlara batı cephesinde bulunan 13 m<sup>2</sup> alana sahip pencereler ile doğal aydınlatma sağlanmaktadır. Ayrıca koridor boyunca 35 adet LED panel armatür bulunmaktadır. Koridorlar tüm katlarda aynı olduğundan, yalnızca birinci kattaki koridordan ölçüm alınmıştır. Koridorun toplam taban alanı 146,6 m<sup>2</sup> 'dir. Merdivenler ana binada asansör çevresinde yer almakta olup 3 koldan oluşmaktadır. Binanın iç kısmında yer aldığı için merdivenlerde doğal aydınlatma sağlayabilecek bir kaynak bulunmamaktadır. Yalnızca 2 adet otomatik açılıp kapanabilen fotoselli floresan armatür vasıtasıyla yapay olarak aydınlatılmaktadır. Merdivenler tüm katlarda aynı özelliklere sahip oldukları için, ölçümler sadece zemin kat ile 1. katı bağlayan merdivende gerçekleştirilmiştir. Merdivenin taban alanı 37,7 m<sup>2</sup>'dir.







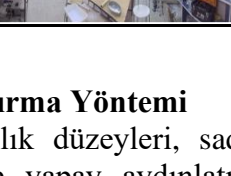
Laboratuvar binasının aydınlatma performansını inceleyebilmek için batı ve doğu yönüne bakan 4 farklı laboratuvar bölümü seçilmiştir. Laboratuvarlardaki yapay aydınlatma kaynağı floresan armatürlerdir. Batı yönüne bakan laboratuvarlardan biri ulaştırma laboratuvarıdır. Ulaştırma laboratuvarı, teknik şartnamelerde yer alan tüm deneyleri yapabilecek altyapıya sahiptir. Taban alanı 78,6 m<sup>2</sup> olan bu laboratuvar, 15,6 m<sup>2</sup> pencere alanına sahiptir. Ulaştırma laboratuvarında 6 adet floresan armatür grubu bulunmaktadır. Batı yönünde yer alan ikinci laboratuvar yapı malzemesi laboratuvarıdır. Bu laboratuvarda agrega deneyleri, çimento ve harç

deneyleri, beton deneyleri gerçekleştirilmektedir. Taban alanı yaklaşık 38 m<sup>2</sup> olan laboratuvarın, pencere alanı 7,2 m<sup>2</sup>'dir. Yapı malzemesi laboratuvarında 4 adet floresan armatür grubu bulunmaktadır. Doğu yönündeki aydınlık performansını inceleyebilmek için gürültülü deneyler odasından ve geoteknik laboratuvarından ölçümler alınmıştır. Gürültülü deneyler odasında agrega ve benzeri diğer ilgili

malzemelerin kırımı gerçekleştirilmektedir. Taban ve pencere alanı ile aydınlatma sayısı yapı malzemesi laboratuvarı ile aynıdır. Geoteknik laboratuvarında, zeminlerin fiziksel özelliklerini belirleyebilecek tüm deneyler yapılmaktadır. Bu laboratuvarın taban alanı 39 m<sup>2</sup> pencere alanı 7,2 m<sup>2</sup>'dir. Laboratuvarda 4 adet floresan armatür grubu bulunmaktadır. Mekanların parametrik tanımları Tablo 2'de verilmektedir.

**Tablo 2.**Çalışma yapılan mekanların parametrik tanımı

No	Fotoğraf	Mekân	Taban Alanı (m <sup>2</sup> )	Pencere Alanı (m <sup>2</sup> )	Pencere Oranı (%)	Cephe Yönü	Kat	Yapay Aydınlatma Sayısı
1		Konferans Salonu	143,3	25,8	18,0	Güney	3	17
2		Teknik Çizim Salonu	143,3	25,8	18,0	Güney	2	17
3		Çalışma Salonu	118	20,1	17,0	Kuzey	Zemin	14
4		Bilgisayar Odası	56,2	8,8	15,7	Kuzey	1	15
5		101 Numaralı Derslik	56,4	8,8	15,6	Kuzey	1	6
6		109 Numaralı Derslik	70,1	12,9	18,4	Kuzey	1	8
7		301 Numaralı Derslik	56,4	8,8	15,6	Güney	3	10

8		309 Numaralı Derslik	70,1	12,9	18,4	Güney	3	7
9		Koridor	146,6	13	8,9	Doğu	1	35
10		Merdiven	37,7	-	-	-	1	2
11		Ulaştırma Laboratuvarı	76,6	15,6	20,4	Batı	Zemin	6
12		Yapı Malzemesi Laboratuvarı	38	7,2	18,9	Batı	Zemin	4
13		Gürültülü Deneyler Odası	38	7,2	18,9	Doğu	Zemin	4
14		Geoteknik Laboratuvarı	39	7,2	18,5	Doğu	Zemin	4

### Araştırma Yöntemi

Aydınlık düzeyleri, sadece doğal aydınlatma, sadece yapay aydınlatma ve her ikisinin de olduğu durum olmak üzere 3 farklı şekilde ölçülmüştür. Doğal aydınlatma seviyesi ölçülürken ışıklar kapatılmış ve perdeler açık bırakılmıştır. Yapay aydınlatma ölçümü esnasında ışıklar açılmış ve perdeler kapatılmıştır. Doğal ve yapay aydınlatma ölçümü sırasında ise hem perdeler hem de ışıklar açılmıştır. Kısaca, doğal aydınlatmada güneşten, yapay aydınlatmada aydınlatma ünitelerinden yayılan ışıklardan, doğal ve yapay aydınlatmada ise hem güneşten hem de armatürlerden yayılan ışıktan faydalanılmıştır.

Ölçümler 2015-2016 öğretim yılı bahar dönemi ve 2016-2017 öğretim yılı güz dönemi

içerisindeki iki farklı tarihte gerçekleştirilmiştir. Yapılan ilk ölçüm 19.06.2016 tarihinde, ikinci ölçüm ise 05.01.2017 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin alındığı tarihler doğal aydınlık düzeyi üzerindeki mevsimsel etkilerin değerlendirilebilmesi amacıyla hem yaz hem de kış dönemi olarak seçilmiştir. Aydınlatma ölçümleri homojen bir şekilde yapılmış olup, doğru bir ölçüm sonucu elde etmek amacıyla ölçüm sık bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Dersliklerde doğal aydınlatma ile doğal ve yapay aydınlatmanın beraber yapıldığı ölçümler sırasıyla 08.30-09.30, 09.30-10.30, 11.30-12.30, 12.30-13.30, 14.30-15.30 ve 16.30-17.30 saatleri arasında yapılmıştır. Yapay aydınlatma düzeyinin gün içinde çok değişmediği tespit

edildiğinden yalnızca 2 ölçüm alınması yeterli görülmüştür. Dersliklerde sıraların bulunduğu en ön, orta ve en arka kısım ile en arka kısmın sağ ve sol köşesi ölçülmüştür. Arka sağ ve sol köşeler, öğrencinin tahtayı izleme pozisyonuna göre değerlendirilmiştir. Koridor ve merdivendeki ölçümler gün içerisinde 3 kez sabah, öğlen ve akşam olmak üzere 09.00-10.00, 13.00-14.00 ve 16.00-17.00 saatleri arasında gerçekleştirilmiştir. Koridordaki pencerede perde bulunmadığı için doğal aydınlatma ile doğal ve yapay aydınlatmanın olduğu durum ölçülmüştür. Merdivenlerde ise sadece yapay aydınlatma ölçülmüştür.

Laboratuvar ölçümleri 09.00-10.00, 13.00-14.00 ve 16.00-17.00 saatlerinde yapılmıştır. Laboratuvar kullanımı sürekli olduğundan yapılan çalışmalara engel olmamak adına ölçüm aralığı çok sık tutulmamıştır. Tüm laboratuvarlar saat 17.00'de kilitlendiği ve çoğunda perde olmadığı için sadece yapay aydınlatmayı kapsayan bir ölçüm yapılamamıştır. Ölçümler taban alanına bağlı olarak her mekân için pek çok farklı noktada gerçekleştirilmiştir.

Ortam ölçümleri için DT-8809A Işık Ölçer Datalogger Cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ortamdaki ışık seviyesini ölçen, ışık şiddetini lux biriminde kaydedebilen dijital bir aydınlık ölçerdir. Cihazın ışık ölçüm seviye aralıkları 0.1 lux-0.1 klux'dur. Ölçümler koridor ve merdiven gibi boş olan yerlerde 80 cm yükseklikte, dersliklerde masalar üzerinde, laboratuvarlarda ise çok kullanılan aletlerin veya tezgahların üzerinde yapılmıştır. Ölçüm yapılırken ışığın cihaz üzerine direk gelmemesine dikkat edilmiştir. Aksi takdirde anormal derecede yüksek rakamlarla karşılaşılacaktır. Cihaz her zaman yatay pozisyonda ve hareketsiz bir şekilde tutulmuştur. Ölçüm alırken ışık şiddetini ölçen kişi ışığın geliş tarafına göre duruşunu ayarlamış, ışığın cihaza ulaşmasına engel olmamaya özen göstermiştir.

## Bulgular ve Değerlendirme

İnşaat mühendisliği bölüm binası ve laboratuvar binasında ölçümler alınarak aydınlık düzeyi tespitleri yapılmış, ölçümler her mekân için

uygun noktalarda gerçekleştirilmiştir. Verilen tablolarda “YA” yapay aydınlatmayı, “DA” doğal aydınlatmayı, “DA&YA” ise doğal ve yapay aydınlatmanın beraber ölçüldüğü durumu temsil etmektedir.

## Özellikli Salon ve Odalara İlişkin Bulgular

TS EN 12464-1 standardında özel olarak belirtilen konferans salonu, teknik çizim salonu, çalışma salonu ve bilgisayar odasına ilişkin sonuçlar her bir kısım için standartça tanımlanan özel aydınlık düzeyi değerine göre değerlendirilmiştir. İlk olarak konferans salonu ele alınmıştır. Konferans salonunda pencere tarafında 3, duvar tarafında 3, kürsüde bir olmak üzere toplam 7 farklı noktadan ölçümler alınmıştır (Tablo 3). TS EN 12464-1 standardına göre konferans salonları için gereken minimum aydınlık düzeyi 500 lux'tür. Tablo 3 incelendiğinde duvar tarafında doğal aydınlatmanın yetersiz kaldığı (<500 lux) görülmektedir. Duvar tarafındaki doğal aydınlatma miktarı, özellikle güz döneminde gün boyunca standardın altında kalırken, bahar döneminde saat 16.30'dan sonra yetersiz kalmaktadır. Konferans salonundaki en yüksek aydınlık düzeyi değeri bahar döneminde 11.30-12.30 saatleri arasında görülmüştür. Bu değer, güz döneminde 12.30-13.30 saatleri arasında görülen değer neredeyse iki katıdır.

Teknik çizim salonunda; kürsü, pencere tarafı, duvar tarafı ve orta sıralar olmak üzere 10 farklı noktadan ölçüm alınmıştır (Tablo 4). Elde edilen değerler, teknik çizim salonları için belirtilen minimum aydınlık düzeyi olan 750 lux ile karşılaştırılmıştır (TS EN 12464-1). Yapay aydınlatma, teknik çizim salonu için oldukça yetersiz kalmaktadır. Doğal aydınlatma güz döneminde öğle saatleri hariç orta ve duvar tarafındaki sıralarda yetersiz kalmaktadır. Bahar döneminde ise doğal aydınlatmanın duvar kenarında standardın altında kaldığı gözlemlenmiştir. Doğal ve yapay aydınlatmanın beraber kullanıldığı durumda, bahar dönemindeki aydınlık düzeyleri çoğunlukla standardın üstündedir. Ancak güz döneminde, duvar tarafındaki ön ve son sıralarda standarttaki değerler sağlanamamıştır. Çalışma salonunda

pencere ve duvar tarafı olmak üzere 4 farklı yerde ölçüm yapılmıştır. Mekânda perde bulunmadığı için sadece yapay aydınlatmanın olduğu durum değerlendirilememiştir (Tablo 5). Aydınlik düzeyi değerleri çoğunlukla standardın (200 lux) üstündedir. Her iki dönemde de duvar tarafındaki ön sıralarda doğal aydınlatma yetersiz kalmaktadır.

Bilgisayar odasında 6 farklı noktadan ölçüm alınmıştır (Tablo 6). Bu odanın sağlıklı bir şekilde çalışılabilir olması için 300 lux ile aydınlatılması gerekmektedir. Ölçüm sonuçları

incelendiğinde, yapay aydınlatma değerlerinin güz ve bahar dönemlerinde farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bunun sebebi odadaki perdelerin gün ışığını geçirmesidir. Yapay aydınlatmanın pencere kenarına ve kürsüye ulaşmadığı tespit edilmiştir. Doğal aydınlatmanın ise duvar tarafında yer alan kürsüde, ilk ve orta sıradaki ölçüm noktalarında istenilen düzeye ulaşmadığı görülmüştür. Doğal ve yapay aydınlatmanın beraber kullanımı ile pencere kenarında istenilen aydınlık düzeyi sağlanabilmektedir. Ancak, köşede yer alması sebebiyle kürsü için gerekli aydınlık düzeyi değeri sağlanamamıştır.

**Tablo 3.**Konferans salonuna ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	YA	08.30-09.30		09.30-10.30		11.30-12.30		12.30-13.30		14.30-15.30		16.30-17.30		
		DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	
Bahar dönemi	Pencere ön	500	2351	2702	4628	5170	4747	5465	2451	2900	880	1111	910	1467
	Pencere orta	522	1389	2147	1431	2169	2460	3166	2243	2731	1347	1800	850	1100
	Pencere son	<b>444</b>	1598	1750	1467	2057	1349	1743	1759	2199	1541	2003	692	1214
	Duvar ön	<b>388</b>	571	1056	804	1130	777	1221	772	1100	600	876	<b>179</b>	628
	Duvar orta	<b>332</b>	<b>333</b>	830	<b>412</b>	888	<b>489</b>	878	711	952	<b>360</b>	700	<b>175</b>	591
	Duvar son	<b>376</b>	<b>250</b>	<b>467</b>	<b>328</b>	557	<b>299</b>	<b>412</b>	<b>458</b>	823	<b>267</b>	648	<b>157</b>	<b>350</b>
	Kürsü	<b>338</b>	3562	3749	3005	3241	3223	3599	3640	3890	1672	1986	609	1119
Güz dönemi	Pencere ön	506	1111	1250	807	1598	831	1756	2012	2500	766	1244	567	995
	Pencere orta	<b>498</b>	910	1138	750	1261	1114	1375	1420	1654	712	1140	593	949
	Pencere son	<b>455</b>	561	1028	700	1067	723	1138	1178	1489	578	1017	<b>365</b>	855
	Duvar ön	<b>378</b>	<b>235</b>	650	<b>243</b>	611	<b>258</b>	639	<b>355</b>	670	<b>183</b>	600	<b>150</b>	563
	Duvar orta	<b>354</b>	<b>162</b>	545	<b>217</b>	550	<b>223</b>	577	<b>263</b>	645	<b>150</b>	550	<b>100</b>	<b>499</b>
	Duvar son	<b>389</b>	<b>100</b>	<b>437</b>	<b>117</b>	<b>477</b>	<b>112</b>	505	<b>148</b>	603	<b>65</b>	<b>475</b>	<b>62</b>	<b>467</b>
	Kürsü	<b>342</b>	567	960	762	1121	798	1201	1080	1423	563	955	<b>405</b>	725

**Tablo 4.** Teknik çizim salonuna ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	YA	08.30-09.30		09.30-10.30		11.30-12.30		12.30-13.30		14.30-15.30		16.30-17.30		
		DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	
Bahar dönemi	Pencere ön sıra	<b>289</b>	2650	2956	3749	4158	5748	6691	5109	6345	5060	5745	4129	4310
	Pencere orta sıra	<b>336</b>	4539	4999	6174	6500	7945	8431	5823	6502	3438	4235	3055	3390
	Pencere son sıra	<b>278</b>	3756	4021	4510	5567	8130	8750	5183	5700	5561	5980	4710	4789
	Orta ön sıra	<b>453</b>	1190	1671	1698	1892	2100	2210	921	1229	955	1190	764	1058
	En orta sıra	<b>500</b>	903	1350	1234	1469	1967	2095	1023	1420	1220	1734	1123	1645
	Orta son sıra	<b>408</b>	<b>269</b>	758	<b>673</b>	1100	1450	1678	815	1540	1316	1692	1234	1603
	Duvar ön sıra	<b>289</b>	<b>511</b>	800	<b>649</b>	888	843	1070	<b>395</b>	<b>710</b>	<b>415</b>	<b>691</b>	<b>393</b>	<b>672</b>
	Duvar orta sıra	<b>477</b>	<b>507</b>	953	<b>555</b>	965	769	1136	<b>435</b>	1050	<b>577</b>	1023	<b>501</b>	981
	Duvar son sıra	<b>412</b>	<b>422</b>	<b>678</b>	<b>499</b>	<b>700</b>	<b>534</b>	956	<b>587</b>	932	<b>629</b>	956	<b>550</b>	938
	Kürsü	<b>345</b>	2138	2456	2778	2854	2769	2950	1875	1875	1754	1567	910	1305

Güz dönemi	Pencere ön sıra	<b>267</b>	1578	1879	2567	2773	5550	5421	4789	4970	3550	3756	2345	2494
	Pencere orta sıra	<b>326</b>	2167	2546	3812	3978	5120	5789	3678	4019	3027	3348	1998	2216
	Pencere son sıra	<b>270</b>	1534	1875	2376	3024	4657	4567	4321	4213	3082	3297	1978	2205
	Orta ön sıra	<b>351</b>	<b>450</b>	853	<b>641</b>	1004	934	1089	880	1110	<b>584</b>	910	<b>456</b>	825
	En orta sıra	<b>524</b>	<b>475</b>	1010	<b>635</b>	1190	931	1333	853	1286	<b>600</b>	1134	<b>422</b>	964
	Orta son sıra	<b>418</b>	<b>345</b>	799	<b>500</b>	936	856	1178	<b>700</b>	1125	<b>489</b>	900	<b>364</b>	788
	Duvar ön sıra	<b>298</b>	<b>196</b>	<b>516</b>	<b>250</b>	<b>567</b>	<b>378</b>	<b>655</b>	<b>362</b>	<b>677</b>	<b>275</b>	<b>534</b>	<b>234</b>	<b>492</b>
	Duvar orta sıra	<b>476</b>	<b>256</b>	<b>740</b>	<b>270</b>	792	<b>410</b>	879	<b>357</b>	857	<b>245</b>	756	<b>199</b>	<b>677</b>
	Duvar son sıra	<b>383</b>	<b>191</b>	764	<b>390</b>	<b>634</b>	<b>315</b>	693	<b>297</b>	<b>658</b>	<b>194</b>	<b>567</b>	<b>152</b>	<b>525</b>
	Kürsü	<b>342</b>	<b>530</b>	900	752	1167	1111	1356	1051	1347	789	1116	<b>541</b>	886

**Tablo 5.**Çalışma salonuna ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	09.30-10.30		13.30-14.30		15.30-16.30		
	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	
Bahar dönemi	Duvar ön	<b>112</b>	278	205	297	<b>65</b>	233
	Pencere ön	638	677	876	1047	560	654
	Duvar son	212	421	599	888	177	416
	Pencere son	547	756	1270	1324	879	1027
Güz dönemi	Duvar ön	<b>118</b>	202	<b>166</b>	257	<b>174</b>	265
	Pencere ön	457	729	644	853	666	1133
	Duvar son	<b>130</b>	219	209	331	232	374
	Pencere son	398	759	515	964	560	980

**Tablo 6.**Bilgisayar odasına ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	YA	08.30	09.30	09.30-10.30		11.30-12.30		12.30-13.30		14.30-15.30		16.30-17.30		
		DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	
Bahar dönemi	Pencere orta	<b>283</b>	940	1174	1040	1250	1045	1350	1101	1427	1956	2150	819	1064
	Pencere sol	<b>193</b>	376	522	558	1148	575	750	750	1030	1453	1650	846	1057
	Pencere sağ	<b>132</b>	<b>244</b>	364	<b>263</b>	399	<b>263</b>	682	522	730	792	933	348	491
	Orta sıra	392	<b>177</b>	538	<b>227</b>	669	<b>240</b>	650	<b>271</b>	680	352	690	<b>174</b>	533
	İlk sıra	440	<b>28</b>	446	<b>42</b>	500	<b>55</b>	520	<b>65</b>	521	<b>59</b>	395	<b>29</b>	407
	Kürsü	<b>231</b>	<b>18</b>	<b>239</b>	<b>24</b>	301	<b>26</b>	<b>296</b>	<b>44</b>	320	<b>34</b>	<b>258</b>	<b>18</b>	<b>195</b>
Güz dönemi	Pencere orta	<b>177</b>	352	525	564	677	585	708	625	755	477	605	407	551
	Pencere sol	<b>194</b>	395	630	657	748	636	775	601	754	605	477	365	496
	Pencere sağ	<b>76</b>	<b>231</b>	305	372	460	386	507	405	515	350	456	<b>286</b>	390
	Orta sıra	303	<b>93</b>	450	<b>208</b>	472	<b>220</b>	410	<b>235</b>	414	<b>130</b>	310	<b>100</b>	320
	İlk sıra	<b>284</b>	<b>30</b>	350	<b>95</b>	395	<b>81</b>	<b>270</b>	<b>89</b>	<b>260</b>	<b>32</b>	<b>200</b>	<b>22</b>	<b>210</b>
	Kürsü	<b>100</b>	<b>22</b>	<b>124</b>	<b>80</b>	380	<b>78</b>	<b>180</b>	<b>86</b>	<b>181</b>	<b>25</b>	<b>120</b>	<b>19</b>	<b>125</b>

### Dersliklere İlişkin Bulgular

Çalışmada yön ve kat farklılıklarını incelemek için 1. kat güney yöne bakan 109 numaralı derslik, 1. kat kuzey yöne bakan 101 numaralı derslik, 3. kat güney yöne bakan 309 numaralı

derslik ve 3. kat kuzey yöne bakan 301 numaralı derslik seçilmiştir. Ölçümler, pencere kenarlarındaki sıraların tam ortasından, köşe sıralardan, orta şeritteki sıraların ortasından, ilk sıralardan ve kürsüden alınmıştır. Dersliklerden

elde edilen aydınlık düzeyi değerleri Tablo 7-10'da gösterilmektedir. Derslikler için standartta tanımlanan aydınlık düzeyi 300 lux'tur (TS EN 12464-1). 101 numaralı derslikten alınan ölçümler incelendiğinde yapay aydınlatmanın ilk ve orta sıra dışındaki alanlarda yetersiz kaldığı görülmektedir (Tablo 7). Doğal aydınlatma bahar döneminde duvar kenarında kalan kürsü ve ilk sıra için yetersiz kalmaktadır. Güz döneminde ise doğal aydınlatmanın kürsü ve ilk sıraya ek olarak orta sıraya da ulaşamadığı görülmektedir. Yapay ve doğal aydınlatmanın beraber kullanıldığı durumda dersliğin tamamında yeterli düzeyde aydınlık sağlanmaktadır.

109 numaralı derslikten alınan ölçümler incelendiğinde yapay aydınlatmanın pencere tarafındaki tüm sıralarda yetersiz kaldığı görülmektedir (Tablo 8). Doğal aydınlatmanın her iki ölçüm döneminde de duvar kenarında yer alan kürsü ve ilk sıraya ulaşamadığı gözlemlenmiştir. Yapay ve doğal aydınlatmanın beraber kullanıldığı durumda dersliğin

tamamında yeterli aydınlık düzeyinin sağlandığı tespit edilmiştir.

301 numaralı derslikten alınan ölçümler incelendiğinde yapay aydınlatmanın pencere tarafındaki orta ve sol sıralarda yetersiz kaldığı görülmektedir (Tablo 9). Doğal aydınlatmanın her iki ölçüm döneminde de duvar kenarında yer alan kürsü ve ilk sıraya ulaşamadığı gözlemlenmiştir. Yapay ve doğal aydınlatmanın beraber kullanıldığı durumda, aydınlık düzeyi derslikteki tüm noktalarda standardın üstündedir.

309 numaralı derslikten alınan ölçümler, yapay aydınlatmanın dersliğin tamamında yetersiz olduğunu göstermektedir (Tablo 10). Doğal aydınlatma değerlerine bakıldığında, aydınlık düzeyinin bahar dönemi için duvar kenarındaki kürsüde; güz dönemi için ise kürsü ve ilk sırada yetersiz kaldığı tespit edilmiştir. Yapay ve doğal aydınlatma beraber kullanıldığında dersliğin tamamında yeterli aydınlık düzeyi sağlanmaktadır.

**Tablo 7.** 101 numaralı dersliğe ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	YA	08.30-09.30		09.30-10.30		11.30-12.30		12.30-13.30		14.30-15.30		16.30-17.30		
		DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	
Bahar dönemi	Pencere kenarı	<b>162</b>	941	1109	1065	1084	1133	1252	1800	1933	1641	1812	941	1113
	Sol köşe	<b>112</b>	776	898	1174	1170	1280	1390	1308	1430	2249	2285	1465	1583
	Sağ köşe	<b>109</b>	309	422	311	419	310	360	356	475	500	600	308	425
	Orta sıra	326	<b>207</b>	560	308	640	340	650	400	755	409	760	302	656
	İlk sıra	331	<b>101</b>	467	<b>129</b>	472	<b>167</b>	512	<b>215</b>	587	<b>195</b>	565	<b>153</b>	526
	Kürsü	<b>281</b>	<b>63</b>	370	<b>88</b>	382	<b>115</b>	394	<b>134</b>	443	<b>119</b>	430	<b>111</b>	406
Güz dönemi	Pencere kenarı	<b>154</b>	314	474	540	705	567	733	817	966	625	755	513	684
	Sol köşe	<b>95</b>	333	443	575	680	565	718	680	787	820	940	412	512
	Sağ köşe	<b>101</b>	<b>110</b>	303	<b>250</b>	380	<b>263</b>	386	<b>266</b>	389	<b>287</b>	350	<b>240</b>	307
	Orta sıra	327	<b>94</b>	440	<b>203</b>	560	<b>201</b>	561	<b>222</b>	588	<b>176</b>	480	<b>140</b>	490
	İlk sıra	341	<b>45</b>	400	<b>122</b>	480	<b>114</b>	495	<b>123</b>	480	<b>95</b>	460	<b>83</b>	434
	Kürsü	<b>247</b>	<b>29</b>	300	<b>97</b>	340	<b>104</b>	364	<b>108</b>	370	<b>76</b>	336	<b>63</b>	335

**Tablo 8.** 109 numaralı dersliğe ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	YA	08.30-09.30		09.30-10.30		11.30-12.30		12.30-13.30		14.30-15.30		16.30-17.30		
		DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	
Bahar dönemi	Pencere kenarı	<b>275</b>	4290	4567	4778	4949	5431	5765	5211	5445	5796	5977	4319	4581
	Sol köşe	<b>158</b>	3750	4197	4879	5298	6689	6821	5671	5807	2497	2617	1617	2019
	Sağ köşe	<b>165</b>	1356	1834	1934	2127	2081	2557	2015	2223	6521	6734	5218	5561

	Orta sıra	341	915	1265	1176	1458	1578	1856	1094	1411	1165	1456	970	1259
	İlk sıra	307	<b>218</b>	500	<b>280</b>	524	323	620	<b>213</b>	486	<b>254</b>	566	<b>188</b>	484
	Kürsü	313	<b>135</b>	345	<b>148</b>	444	<b>248</b>	578	128	434	<b>181</b>	465	<b>142</b>	371
Güz dönemi	Pencere kenarı	<b>255</b>	1359	1635	1756	2066	3145	3410	3054	3324	3434	3741	1946	2402
	Sol köşe	<b>145</b>	889	1035	1555	1720	1967	2076	1567	1741	1783	1924	978	1086
	Sağ köşe	<b>157</b>	850	987	1187	1349	2123	2347	2199	2348	2296	2450	1746	1876
	Orta sıra	333	<b>225</b>	570	491	749	666	765	503	845	475	823	315	645
	İlk sıra	301	<b>70</b>	384	<b>105</b>	414	<b>192</b>	435	<b>158</b>	480	<b>164</b>	488	<b>97</b>	417
	Kürsü	<b>299</b>	<b>39</b>	328	<b>66</b>	379	<b>100</b>	371	<b>119</b>	386	<b>95</b>	378	<b>60</b>	353

**Tablo 9.** 301 numaralı dersliğe ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	YA	08.30-09.30		09.30-10.30		11.30-12.30		12.30-13.30		14.30-15.30		16.30-17.30		
		DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	
Bahar dönemi	Pencere kenarı	<b>251</b>	1678	1955	1724	2080	2635	2898	3626	3860	2527	2925	1325	1520
	Sol köşe	<b>231</b>	710	884	1030	1375	1461	1665	1784	1996	1222	1375	1200	1365
	Sağ köşe	301	311	457	478	610	392	555	452	696	352	588	320	565
	Orta sıra	390	734	1050	842	1065	1074	1470	1748	2145	1092	1480	682	985
	İlk sıra	458	<b>235</b>	588	<b>256</b>	670	<b>274</b>	720	475	930	<b>290</b>	740	<b>230</b>	575
	Kürsü	391	<b>103</b>	371	<b>111</b>	462	<b>121</b>	525	<b>195</b>	620	<b>108</b>	526	<b>98</b>	360
Güz dönemi	Pencere kenarı	<b>223</b>	1040	1194	1058	1201	1080	1320	1190	1350	1150	1240	850	965
	Sol köşe	<b>221</b>	690	923	712	1020	796	1043	745	910	670	815	453	570
	Sağ köşe	303	<b>257</b>	367	303	366	346	386	370	402	355	383	<b>238</b>	357
	Orta sıra	353	380	789	395	812	490	905	543	810	465	650	325	489
	İlk sıra	371	<b>153</b>	624	<b>211</b>	655	<b>229</b>	685	<b>240</b>	530	<b>180</b>	390	<b>110</b>	310
	Kürsü	338	<b>93</b>	480	<b>132</b>	493	<b>166</b>	536	<b>175</b>	335	<b>114</b>	385	<b>57</b>	372

**Tablo 10.** 309 numaralı dersliğe ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	YA	08.30-09.30		09.30-10.30		11.30-12.30		12.30-13.30		14.30-15.30		16.30-17.30		
		DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	
Bahar dönemi	Pencere kenarı	<b>298</b>	3445	3571	3658	3976	4965	5155	6000	6341	2810	2891	2302	2575
	Sol köşe	<b>267</b>	4000	4286	4120	4512	4976	5375	2679	2948	1802	2023	919	1199
	Sağ köşe	<b>151</b>	2245	2435	3328	3513	4513	4690	3925	4325	3808	4178	2543	2887
	Orta sıra	<b>276</b>	2078	2457	2920	3232	2419	2698	3071	3300	1889	2112	775	1041
	İlk sıra	<b>287</b>	515	855	770	1106	880	1185	845	1162	655	906	310	555
	Kürsü	<b>233</b>	<b>267</b>	523	415	750	523	810	328	821	340	541	<b>150</b>	408
Güz dönemi	Pencere kenarı	<b>293</b>	1569	1889	3078	2474	3591	3658	3978	4133	2301	2450	1647	1785
	Sol köşe	<b>258</b>	1111	1317	2146	2369	1900	2100	1665	1878	992	1198	756	962
	Sağ köşe	<b>149</b>	1065	1115	1719	1789	2345	2395	3108	3201	1535	1678	1127	1255
	Orta sıra	<b>263</b>	588	810	791	1055	942	1200	1289	1525	765	989	539	765
	İlk sıra	<b>275</b>	<b>181</b>	467	<b>231</b>	534	<b>270</b>	560	315	600	<b>214</b>	500	<b>160</b>	450
	Kürsü	<b>222</b>	<b>99</b>	335	<b>121</b>	375	<b>145</b>	362	<b>157</b>	386	<b>99</b>	335	<b>95</b>	325



### Dersliklerin Mevsime, Yöne ve Kot Farkına Bağlı olarak Değerlendirilmesi

Dersliklerden elde edilen aydınlık düzeyleri değerlendirildiğinde, tüm dersliklerde bahar dönemi değerlerinin güz dönemi değerlerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ölçüm değerleri standartla kıyaslandığında, bahar dönemi değerleri standardı güz dönemine göre daha büyük bir oranla sağlamıştır. Aynı kattaki güney (109, 309) ve kuzey yöne bakan derslikler (101, 301) incelendiğinde; güney yönünde yer alan dersliklerin, kuzey yönünde yer alanlara göre daha iyi aydınlandığı tespit edilmiştir. Aynı saat diliminde alınan ölçümlerde doğal aydınlatma performansları karşılaştırıldığında; 109 numaralı derslikteki değerler 101 numaralı dersliğin yaklaşık 3 katıyken, 309 numaralı derslikteki değerler 301 numaralı dersliğin neredeyse 2 katıdır. Dersliklerin aydınlatma performansları buldukları kota göre karşılaştırıldığında ise üçüncü kattaki dersliklerin (301, 309) birinci kattaki benzer dersliklerine göre (101, 109) daha iyi aydınlandığı görülmüştür.

### Koridor ve Merdivene İlişkin Bulgular

Koridorlarda doğal aydınlatma sadece batı cephesinden 4 adet 2 kanatlı sürgülü alüminyum pencere ile sağlanmaktadır ve binanın iç kısmına doğru ilerlendikçe doğal aydınlatma seviyesinde azalma gözlenmektedir. Ölçümler sonucunda çıkan bulgular Tablo 11'de gösterilmiştir. Koridorlar için standartta tanımlanan değer 100 lux'tür (TS EN 12464-1). Buna göre doğal aydınlatma durumunda, pencere tarafı yeterli aydınlatmaya sahipken iç kısımlarda genelde yetersiz aydınlatma hakimdir. Doğal ve yapay aydınlatmada ise tamamında yeterli aydınlatma gözlemlenmiştir.

Merdivenler ana binada asansör çevresinde yer almakta olup 3 koldan oluşmaktadır. Binanın iç kısmında yer aldığı için pencere gibi doğal aydınlatma sağlayabilecek bir kaynak bulunmamakta, 2 adet otomatik açılıp kapanabilen fotoselli floresan armatür vasıtasıyla yapay olarak aydınlatılmaktadır. Merdivenler tüm katlarda aynı özelliklere sahip oldukları için ölçümler yalnızca en yüksek değere çıkabilecek

zemin kat ile 1. katı bağlayan merdivende gerçekleştirilmiştir (Tablo 12). TS EN 12464-1 standardına göre merdivenlerde olması gereken minimum aydınlık düzeyi 150 lux'tür. Ölçüm değerleri standart ile karşılaştırıldığında, merdivene yeterli aydınlatmanın sadece bahar döneminde zemin kattaki alt kısımda sağlandığı görülmektedir. Alınan diğer tüm ölçüm sonuçlarında aydınlatmanın yetersiz olduğu gözlemlenmiştir.

**Tablo 11.** Koridora ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	09.30-10.30		13.30-14.30		15.30-16.30		
	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	
Bahar dönemi	Kapalı Taraf	35	253	29	234	15	298
	Ara Değer	154	618	123	521	22	506
	Ara Değer	349	817	422	631	141	555
	Pencere Kısmı	3114	3642	1876	3653	1621	2125
Güz dönemi	Kapalı Taraf	24	135	16	175	5	205
	Ara Değer	101	302	112	342	7	389
	Ara Değer	240	545	170	574	113	496
	Pencere Kısmı	1600	2101	1243	1714	724	1234

**Tablo 12.** Merdivene ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	09.30-10.30		13.30-14.30		15.30-16.30		
	Bahar	Güz	Bahar	Güz	Bahar	Güz	
Yapay Aydınlatma	Aşağı Kısım	164	58	168	61	143	73
	Alt Sahanlık	27	40	28	43	22	37
	Orta Kısım	2	7	4	8	1	3
	Sahanlık	34	25	36	28	32	32
	Üst Kısım	103	32	105	30	95	26

### Laboratuvarlara İlişkin Bulgular

Ulaştırma laboratuvarı laboratuvar binasının batı kısmında yer almakta olup, ince uzun bir geometriye sahip olduğundan pencere tarafından 3, duvar tarafından 3 olmak üzere toplam 6 ölçüm alınmıştır (Tablo 13). Standartta laboratuvarlar için belirlenen minimum aydınlık düzeyi 500 lux'tür (TS EN 12464-1). Tablo 13 incelendiğinde pencere tarafının arka kısmı hariç laboratuvarın aydınlatma açısından yetersiz olduğu görülmüştür.

Yapı malzemesi laboratuvarı laboratuvar binasının batı kısmında en sağda yer almaktadır. Bu ve diğer laboratuvarlarda perde veya

herhangi bir güneş kırıcı olmadığı için yapay aydınlatmaya ilişkin bir ölçüm alınamamıştır (Tablo 14). Doğal aydınlatma ile doğal ve yapay aydınlatmanın birlikte kullanıldığı durumlarda laboratuvarın tamamının yetersiz aydınlatmaya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Gürültülü deneyler odası, yapı malzemesi laboratuvarının tam karşısında ve binanın doğusunda yer almaktadır. Alınan ölçümlere göre aydınlık düzeyi bahar döneminde sabah, güz döneminde

öğlen olmak üzere pencerenin önü dışında genellikle yetersizdir (Tablo 15).

Geoteknik laboratuvarı laboratuvar binasının doğusunda, ulaştırma laboratuvarının karşısında yer almaktadır. Alınan ölçüm değerleri Tablo 16'da gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde laboratuvardaki ölçüm noktalarının tamamı yetersiz aydınlatmaya sahiptir.

**Tablo 13.** Ulaştırma laboratuvarına ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	YA	09.30-10.30		13.30-14.30		15.30-16.30	
		DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA
Bahar Dönemi	Duvar ön	85	114	49	170	65	152
	Duvar orta	79	98	38	159	83	141
	Duvar arka	143	137	123	284	72	187
	Pencere ön	157	255	260	361	387	400
	Pencere orta	151	197	194	358	349	450
	Pencere arka	233	182	619	716	566	788
Güz Dönemi	Duvar ön	83	98	43	155	54	140
	Duvar orta	79	91	21	149	68	135
	Duvar arka	140	131	118	240	59	169
	Pencere ön	151	243	254	321	377	393
	Pencere orta	130	184	185	347	354	441
	Pencere arka	223	180	598	614	499	489

**Tablo 14.** Yapı malzemesi laboratuvarına ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	09.30-10.30		13.30-14.30		15.30-16.30		
	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	
Bahar dönemi	Duvar ön	24	138	43	158	21	136
	Pencere ön	157	418	165	488	154	462
	Duvar arka	27	95	39	121	17	100
	Pencere arka	96	187	158	257	140	243
Güz dönemi	Duvar ön	21	125	35	137	15	130
	Pencere ön	151	401	157	479	146	453
	Duvar arka	20	88	31	100	12	89
	Pencere arka	94	179	143	250	125	236

**Tablo 15.** Gürültülü deneyler odasına ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	09.30-10.30		13.30-14.30		15.30-16.30		
	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	
Bahar dönemi	Duvar ön	217	305	39	122	7	71
	Pencere ön	1483	1659	312	392	162	284

	Kapı arka	257	352	50	154	19	99
	Pencere arka	196	309	24	127	5	78
Güz dönemi	Duvar ön	28	93	79	170	44	68
	Pencere ön	294	367	420	620	159	235
	Kapı arka	169	250	280	380	50	74
	Pencere arka	37	117	95	230	218	227

**Tablo 16.** Geoteknik laboratuvarına ait aydınlık düzeyi değerleri (lux)

Ölçülen Durumlar	09.30-10.30		13.30-14.30		15.30-16.30		
	DA	DA&YA	DA	DA&YA	DA	DA&YA	
Bahar dönemi	Duvar ön	3	79	5	93	4	85
	Pencere ön	20	161	33	194	25	147
	Duvar arka	4	184	9	168	2	155
	Pencere arka	64	111	59	127	19	70
	Orta	18	89	23	98	5	69
Güz dönemi	Duvar ön	0	75	2	86	0	75
	Pencere ön	17	147	29	169	20	134
	Duvar arka	2	172	6	154	0	147
	Pencere arka	61	106	42	120	21	74
	Orta	15	83	16	91	2	72

## Sonuç ve Öneriler

Eğitim yapılanın sağlıklı görsel konfor koşullarına sahip olması, öğrenme performansı, çalışanların ve öğrencilerin motivasyonu ve çalışma üretkenliği için çok önemlidir. Sağlıklı görsel konfor koşullarının sağlanması aydınlatma ile mümkün kılınmaktadır. Bu çalışma kapsamında Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ana binası ve eklentisinde yer alan farklı mekânların aydınlık düzeyleri ölçülmüş ve bulgular değerlendirilmiştir. Derslikler, çalışma salonu, konferans salonu, bilgisayar odası, teknik çizim salonu, merdiven, koridor ve laboratuvarlar olmak üzere toplam 14 farklı mekânda ölçülen değerler TS EN 12464-1 standardı ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan ölçümleri genel anlamda değerlendirmek gerekirse doğal aydınlatmanın pencere kenarlarında yeterli ancak pencere kenarlarından uzaklaştıkça dersliklerin ön kısımlarına yaklaştıkça yetersiz seviyeye ulaştığı tespit edilmiştir. Yapay aydınlatmada ise dersliklerin genel anlamda ön ve orta kısımlarının aydınlık düzeylerinin yeterli olduğu,

dersliklerin arka kısımlarının aydınlık düzeylerinin ise yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. Doğal ve yapay aydınlatmada ise dersliklerin tamamının TS EN 12464-1 standardına uyduğu gözlenmiştir. Koridorlarda doğal aydınlatma pencere kenarında yeterli aydınlık düzeyinde iken, pencere kenarından uzaklaştıkça yetersiz hale gelmiştir. Merdiven ve laboratuvarların aydınlık düzeyi yetersiz bulunmuştur.

Laboratuvar çalışmalarının daha sağlıklı bir şekilde sürdürülebilmesi, merdiven ve laboratuvarlarda aydınlatma yetersizliğinden kaynaklanabilecek olası kazaların önlenmesi için aydınlatma düzeni değiştirilmelidir. Bu bağlamda öncelik doğal aydınlatmanın artırılmasına ilişkin çözüm önerileri olmalıdır. Yetersiz aydınlatmanın doğal yollarla desteklenebilmesi için gün ışığını engellemek ve bu ışığı tavana yönlendirmek amacıyla pencerenin iç ve dış yüzeyinde yer alan yatay veya yataya yakın ışık rafları tercih edilebilir. Işık rafları hem göz kamaşmasını engeller hem de dış görüşü sağlamaya yardımcı olur. Yine

benzer şekilde ışık bacaları kullanılarak çatıdan dersliklere uzatılacak bacalardan ışık geçişi sağlanabilir. Ayrıca açık renkli ve saydam yüzeylerin tercih edilmesi aydınlık düzeyinin artmasına yardımcı olacaktır. Laboratuvarlarda pencerelerdeki tozlu ve kirli yüzeylerin sürekli temizlenmesi ile yansıyan ışığın değeri artacak ve görsel konfor açısından uygun ortam sağlanacaktır. Buna ek olarak mümkünse pencere sayısının artırılması da yetersiz aydınlatmanın önlenmesini sağlayacaktır. Doğal aydınlatma ile yeterli aydınlık düzeyine ulaşamadığı durumlar için yapay aydınlatmaya ilişkin de iyileştirmeler yapılmalıdır. Standartta göre yetersiz kalan eski floresan armatürlerin daha az enerji tüketen ve daha uzun süre kullanılabilen LED armatürlerle değiştirilmesi gerekmektedir. Bu sayede bina ve eklentilerinde enerji tüketimi azalacak, görsel konfor koşulları sağlanacaktır.

## Kaynaklar

- Anon, (2000). IESNA, Lighting Handbook, Ed. M.S.Rea, USA.
- AS/NZS 1680.2.3: Interior and Workplace Lighting, Part 2.3: Specific Applications – Educational and Training Facilities, (2008) Council of Standards of Australia and New Zealand.
- Bostancı Başkan, T. ve Şerefhanoglu Sözen, M. (2006). Dersliklerde Görsel Konfor ve Etkin Enerji Kullanımı – Bir Örnek Derslik Aydınlatması, *Megaron Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi E-Dergisi*, 1(2), 143-153.
- Capeluto, J.G., (2003). The Influence Of The Urban Environment On The Availability of Daylighting in Office Buildings in Israel, *Building and Environment*, sayfa 38, s. 745-52.
- CIBSE (2002), Code for lighting, Oxford, Butterworth-Heinemann.
- DIN 5034-4: 1994. Daylight in Interiors - Part 4: Simplified Method Of Determining Window Sizes For Dwellings (1994). German Institute for Standardization (Deutsches Institut für Normung).
- Güvenkaya, R., Küçükdoğu, M., (2009). İlköğretim dersliklerinde aydınlatma enerjisi yönetiminde yönere göre uygun cephe seçeneklerinin belirlenmesi, *İTÜ dergisi/a*, cilt 8, Sayı 2, s. 77-88.
- Köknal Yener, A., Kutlu Güvenkaya, R., Şener, F. (2009). İlköğretim Dersliklerinin Görsel Konfor Açısından İncelenmesi ve Değerlendirilmesi, *İTÜ Dergisi/a, Mimarlık, Planlama, Tasarım*, 8(1), 105-116.
- Kruger, L.E., Dorigo, A.L., (2008). Daylighting Analysis in A Public School in Curitiba, Brazil, *Renewable Energy*, sayfa 33, s. 1695-1702.
- Leslie, R.P., (2003). Capturing The Daylight Dividend in Buildings, Why and How?, *Building and Environment*, sayfa 38, s. 381-5.
- Sirel, Ş., (1992), Aydınlığın niteliği, Kitapçık no. 4, YFU.
- Sirel, Ş. (1997). Aydınlatma sözlüğü, YEM Yayın, İstanbul.
- Şerefhanoglu, M., (1992). Yapıların İç Aydınlatmasında Güneşi ile Lamba Işığının Temel Özellikleri Ve Ayrımları, Yıldız Mimarlık Fakültesi Yayını, İstanbul.
- TS EN 12464-1: Işık ve Aydınlatma-Çalışma alanlarının aydınlatılması- İç Ortam çalışma alanları (2013). Aydınlatma ve Bina İçi Tesisleri ile Yardımcı Donanımları Teknik Komitesi, Ankara.
- Winterbottom, M, Wilkins, A., (2009). Lighting And Discomfort in The Classroom, *Journal of Environmental Psychology*, sayı 29, s. 63-75.
- Yener, A.K., Güvenkaya, R., Şener., F., (2009), İlkokul Sınıflarında Görsel Konfor ve Enerji Verimi, *TTMD Isıtma, Soğutma, Havalandırma, Klima, Yangın ve Sıhhi Tesisat Dergisi*, Temmuz-Ağustos, 30-5.

## Evaluation of Educational Buildings with Respect to Lighting Performance

### Extended abstract

*Lighting is one of the most important factors affecting visual comfort. Selecting accurate lighting system in educational buildings positively affects the performance of students and trainers. Nevertheless, studying under inappropriate visual conditions could cause various problems such as dry eye, tears, blurred vision, eye fatigue and headache. In order to increase academic performance of the students and please them with the psychological environment of the conditions, the visual comfort must be healthfully provided according to the needs of the users.*

*In this study, lighting conditions in Ege University Civil Engineering department building and its laboratory extension were evaluated in terms of user health. Within the scope of the study, the interior lighting levels, lighting types and importance were investigated and evaluated for the 2015-2016 spring and 2016-2017 fall academic year semesters.*

*The luminometers were used to measure the illumination level in 14 different interior spaces including classrooms, conference hall, study hall, computer room, technical drawing room, staircase, corridor and laboratories of soil mechanics, materials of construction, transportation and structure. The lighting levels of natural lighting, artificial lighting and the combined version of natural and artificial lighting were measured in each place.*

*The measurement results were compared with TS EN 12464-1 Standard which has defined illuminance levels as 300 lux for classrooms and computer rooms, 500 lux for conference halls and laboratories, 750 lux for technical drawing rooms, 150 lux for stairs and 100 lux for corridors.*

*According to the measurement results, it was found that natural illumination was sufficient at the window edges of the classrooms but when moved away from the edges of the windows, the illumination levels of the classrooms reached inadequate values as approached the front. For the artificial illumination, it was observed that the illumination levels of the front and middle parts of the classrooms were sufficient; however, the illumination levels of the rear parts in the classrooms were observed as insufficient. For the combined measurements of the natural and*

*artificial lighting, all classrooms were observed to comply with TS EN 12464-1 standard. While natural lighting in the corridors had sufficient illumination levels on the window side, it became insufficient as it moved away from the edge of the window. The illumination levels of the stairs and laboratories was observed as insufficient levels.*

*In addition, for the classrooms located on different levels and directions, the illumination values of the different months of the year were discussed within the scope of the study. It was observed that spring semester values were higher in all classrooms than fall semester. It was found that the classrooms on the same floor, which were located in the south direction, were better illuminated than those located in the north direction. According to the elevation levels; the classrooms on the third floor were better illuminated than the similar classrooms on the first floor.*

*It is recommended that illumination levels and visual comfort conditions should be improved to maintain healthier studies in the laboratories and to prevent potential accidents due to lack of lighting, In this context, priority should be given to solutions which increase natural daylighting for energy efficiency.*

**Keywords:** *Natural Lighting, Artificial Lighting, Indoor Illuminance Levels, Occupants' Health*



## Radye Temel Oturma Hesabı için Yeni bir Yöntem

**Murat HAMDERİ\***

Türk-Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul

[hamderi@tau.edu.tr](mailto:hamderi@tau.edu.tr) ORCID: 0000-0002-9167-8866, Tel: (216) 332 31 22

Geliş: 27.04.2019, Revizyon: 23.08.2019, Kabul Tarihi: 27.01.2020

### Öz

Literatürde radye temellerin oturması için verilen formüller, elastik bir yaklaşım sağlamakta, temel kalınlığının ve farklı zemin tabakalarının hesaba katılmasına olanak tanımamaktadır. Formüllerdeki bu eksiklikler, uygulamacıları proje verilerinin daha detaylı olarak tanımlanabildiği sonlu elemanlar programlarını kullanmaya yöneltmiştir. Ancak sonlu elemanlar programı kullanımı, sıradan projeler için pahalı olmakta ve uzun sürmektedir. Bu pahalı ve uzun süren yaklaşıma alternatif olarak, bu çalışma kapsamında, 3-boyutlu sonlu elemanlar tabanlı bir radye temel oturma formülü tanıtılmış ve formül iki vaka çalışmasına uygulanmıştır. Formül, radyenin elastisite modülünü, enini, boyunu, kalınlığını, yayılı yükü ve 5 adet zemin tabakasının zemin modülünü ve Poisson oranını bünyesine almaktadır. Önerilen bu yöntem ile mühendisler radye temel oturmasını ve sehimini kolay ve güvenilir bir şekilde hesaplayabileceklerdir.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin, Radye, Temel, Oturma, Formül

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Geçen yüzyılda, sığ temellerin oturma hesabı için birçok formül önerilmiştir. Bu formüller, kullanılan yaklaşım bakımından 3 gruba ayrılabilir: 1-)Elastik yaklaşımlar, (Janbu vd., 1956, Grioud, 1972, Das, 1983, Mayne ve Poulos, 1999, Bowles, 1987, Mohamed vd., 2013), 2-) SPT- tabanlı yaklaşımlar (Terzaghi ve Peck, 1948, Meyerhof, 1956, Burland ve Burbidge, 1985, Erzin ve Gul, 2013), 3-) CPT-tabanlı yaklaşımlar (De Beer, 1965, Schmertmann, 1970, Berardi vd., 1991, Mir vd., 2017).

Lutenegger ve Degroot, 1995, Texas A & M Üniversitesindeki radye temel yükleme deneyinden çıkan sonuçları, değişik oturma formüllerinin verdiği sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Yükleme deneyinde 25 mm oturma oluşturan yükü, SPT-tabanlı formüllere girdiklerinde, oturmayı 42 mm (67% sapma), CPT-tabanlı formüllere girdiklerinde ise 53 mm (113% sapma) olarak bulmuşlardır. Hesapla bulunan oturma hassasiyetinin son derece düşük ve oturmaların biri birlerinden çok farklı çıkması, oturma formüllerindeki hassasiyet sorununu işaret etmektedir. Das and Nagaratnam, 2007 mevcut formüllerin oturmaları yüksek, zemin emniyet gerilmelerini ise düşük çıkardığını bildirmektedir.

Öte yandan radye temellerin oturması için verilen mevcut formüller, elastik bir yaklaşım sağlamakta, temel kalınlığının ve farklı zemin tabakalarının hesaba katılmasına olanak tanımamaktadır. Son zamanlarda 3-boyutlu zemin-yapı sonlu elemanlar analizleri yapabilecek güçte bilgisayarların yaygınlaşması ile radye temellerin oturma tahmini daha hassas yapılabilir hale gelmiştir. Bu yöntemle, Hamderi, 2019 90 farklı konfigürasyondaki 3-boyutlu sonlu elemanlar radye sisteminden elde ettiği verileri kullanarak bir oturma formülü geliştirmiştir. Formül, radyenin elastisite modülünü, enini, boyunu, kalınlığını, yayılı yükü ve 5 adet zemin tabakasının zemin

modülünü ve Poisson oranını bünyesine almaktadır. Bu çalışma kapsamında, 3-boyutlu formül 2 ayrı vaka çalışmasına uygulanmıştır. Formülün uygulanma adımları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu formül yardımıyla, mühendisler, radye temellerin oturmasını kolay ve güvenilir bir şekilde hesaplayabileceklerdir.

## Materyal ve Yöntem

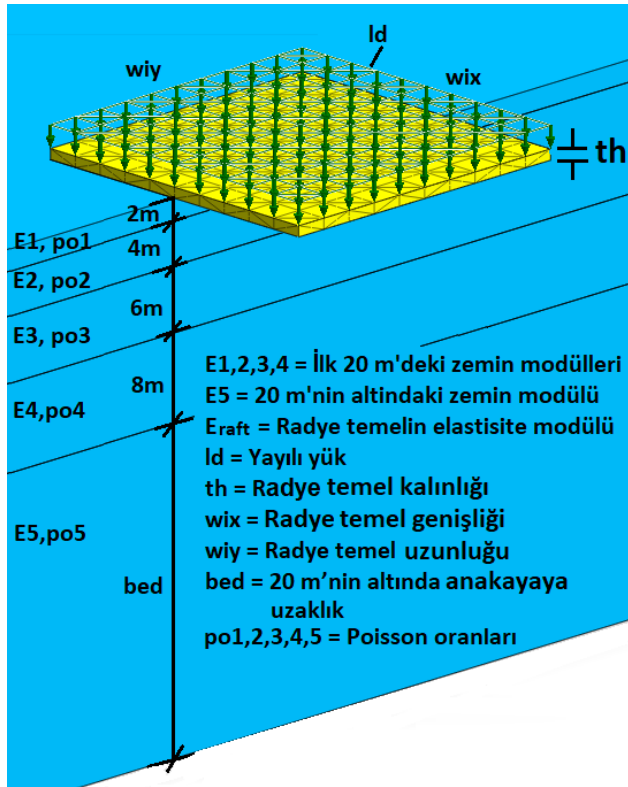
### Radye Temel Oturma Formülü

Hamderi, 2019 tarafından önerilen radye temel oturma formülü, dikdörtgen şeklindeki radyenin eninin ve boyunun ( $w_x, w_y$ ), kalınlığının ( $th$ ), elastisite modülünün ( $E_c$ ); radyeye etkiyen üniform yayılı yükün ( $ld$ ); 5 adet zemin tabakasının zemin modüllerinin ( $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$ ), Poisson Oranlarının ( $po_1, po_2, po_3, po_4, po_5$ ) oturma hesabında kullanılmasına olanak vermektedir. Bu parametrelerin analitik gösterimi Şekil 1'de verilmektedir. Dikdörtgen şeklindeki radyede metre cinsinden meydana gelebilecek en büyük oturma Eşitlik 1'de verilmektedir (Hamderi, 2019).

$$S = S_b \cdot \left(\frac{w_x \cdot w_y}{u_1}\right)^a \cdot \left(\frac{E_1}{u_2}\right)^b \cdot \left(\frac{E_2}{u_3}\right)^c \cdot \left(\frac{E_3}{u_4}\right)^d \cdot \left(\frac{E_4}{u_5}\right)^e \cdot \left(\frac{E_5}{u_6}\right)^f \cdot \left(\frac{ld}{u_7}\right)^g \cdot \left(\frac{bed}{u_8}\right)^h \cdot \left(\frac{th}{u_9}\right)^i \cdot \left(\frac{E_c}{u_{10}}\right)^j \cdot \left(\frac{po_1}{u_{11}}\right)^k \cdot \left(\frac{po_2}{u_{12}}\right)^l \cdot \left(\frac{po_3}{u_{13}}\right)^m \cdot \left(\frac{po_4}{u_{14}}\right)^n \cdot \left(\frac{po_5}{u_{15}}\right)^o \quad (1)$$

Oturma formülünde yukarıda bahsedilen girdi parametrelerinin dışında a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o gibi birimsiz denklem katsayıları (Tablo 1) bulunmaktadır. Birimsiz denklem katsayılarının fiziksel anlamları, Hamderi, 2019 makalesinde detaylı olarak açıklanmaktadır. Bunlara ilaveten denklemin birim tutarlılığını sağlamak için  $S_b, u_1 \dots u_{15}$ , adları altında birimli sabitler bulunmaktadır (Tablo 2). Bu yöntemle, örneğin, betonun elastisite modülü  $E_c = 25000-40000$  [kN/m<sup>2</sup>], birimli  $u_{10} = 25000$  [kN/m<sup>2</sup>] sabitine bölünerek birimsiz ve 1'e yakın yapılmaktadır (Eşitlik 1). Öte yandan formülün en iyi sonuç verdiği, formülün türetilmesinde kullanılan parametre aralığı da Tablo 3'de

verilmektedir. Formül havuzundaki kombinasyonlarda Mohr-Coulomb elasto-plastik zemin modeli kullanılmıştır. Her ne kadar formülün içinde bir miktar nonlineerlik olsa da, aslında formül elastik yaklaşımlara daha yakın sonuç verir. Bunun sebebi formül havuzunda Mohr-Coulomb zemin modelinin iyi modelleyemediği, aşırı plastik davranışa sebebiyet veren düşük modüllü zeminlerin olmayışındır. Formül havuzunda kullanılan en düşük zemin modülü 15 MPa'dır (Tablo 3).



Şekil 1. Radye temel oturma formülünün parametrelerinin analitik gösterimi (Hamderi, 2019'dan yeniden inşa edilerek.)

Tablo 1. Oturma formülünün birimsiz denklem katsayıları (Hamderi, 2019)

a	b	c	d	e
0,4387	-0,1073	-0,1996	-0,2258	-0,2287
f	g	h	i	j
-0,1874	1,0214	0,0957	-0,1338	-0,0616
k	l	m	n	o
-0,0566	-0,0475	-0,0446	-0,0347	-0,0645

Tablo 2. Oturma formülünün birimli sabitleri (Hamderi, 2019)

Sembol	Değer	Birim
$S_b$	0,1294	[m]
$u_1$	400	[m <sup>2</sup> ]
$u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$	10000	[kN/m <sup>2</sup> ]
$u_7$	100	[kN/m <sup>2</sup> ]
$u_8$	30	[m]
$u_9$	1	[m]
$u_{10}$	25000	[kN/m <sup>2</sup> ]
$u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}$	0,35	[-]

Tablo 3. Oturma formülünün en iyi sonuç verdiği parametre aralığı (Hamderi, 2019)

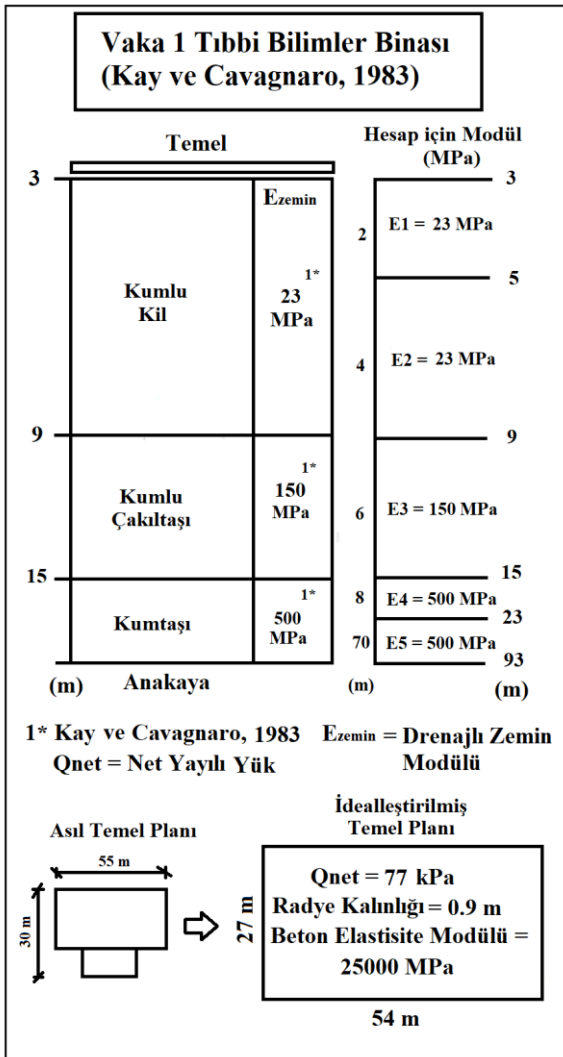
Tanım	Sem.	Aralık	Birim
x yönündeki radye t. genişliği	$w_x$	(3-54)	m
y yönündeki radye t. uzunluğu	$w_y$	(3-50)	m
İlk 20 m'deki zemin modülleri	$E_1, E_2, E_3, E_4$	(15-600)	MPa
20 m'nin altındaki zemin modülü	$E_5$	(15-600)	MPa
Radye t.'in elastisite modülü	$E_{raft}$	(10-50)	GPa
Zemin tabakalarının Poisson's oranları	$po_1, po_2, po_3, po_4, po_5$	0,2-0,45	-
Yayıllı yük	$ld$	(10-800)	kPa
20 m'nin altında anakayaya olan uzaklık	$bed$	(30-100)	m
Radye temel kalınlığı	$th$	(0,5-3,0)	m

### Vaka Çalışması 1'in Önerilen Formül ile Çözülmesi (Kay ve Cavagnaro, 1983)

Kay ve Cavagnaro, 1983 tarafından iletilen çalışma, Adelaide, Güney Avustralya'da 1979 yılında inşa edilen Tıbbi Bilimler Binası'nın oturma ölçümlerini içermektedir. Bina giriş ve bodrum katları dahil 9 katlıdır. Bina 55 m x 30



m boyutlarında 0.90 m kalınlığındaki bir radye temele oturmaktadır. Referans çalışmada, temel zeminine ortalama 128 kPa yük etkidiği belirtilmektedir. Temelin kazı kotu, yüzeyin 3 m altındadır. Temel altında, 6 m kalınlığında kumlu kil tabakası, onun altında ise 6 m kalınlığında kumlu çakıl taşı tabakası ve 12 m'den sonra ise kumtaşı tabakası vardır. Arazide koni penetrasyon testi (CPT) ve sondaj kuyusu boyunca plaka yükleme testleri yapılmıştır. Anakayanın derinliği ise referans makalede verilen genel jeoloji profilinden elde edilmiştir. Vaka çalışması ile ilgili detaylar Şekil 2'de özetlenmektedir. Bu çalışmada önerilen formül ile oturmanın bulunma adımları aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil 2. Vaka Çalışması 1'in Detayları (Kay ve Cavagnaro, 1983)

**Adım 1-2 (wix ve wiy'nin tayini):** Asıl temel biri birlerine bitişik iki adet dikdörtgen temelden meydana gelmektedir (Şekil 2). Kay ve Cavagnaro'nun çalışmasında bu iki bitişik temel, boyu 54 m ve genişliği 27 m olan dikdörtgen şeklinde tek bir radye temele dönüştürülmüştür. Referans çalışmadaki bu değerler aynı şekilde kullanılmışlardır (Tablo 4, Kolon 1 ve 2). Tek bir radye temel kabulünde en büyük oturma merkezde olacaktır. Öte yandan biri birlerine bitişik olan iki temelde en büyük oturma ortak kenara yakındır.

**Adım 3 (th'nin tayini):** Radye temelin kalınlığı (th) referans çalışmada 0.9 m olarak verilmiştir (Tablo 4, Kolon 3).

**Adım 4-8 (E1, E2, E3, E4, E5'in tayini):**

E<sub>1</sub>-E<sub>5</sub> değişik derinliklerde karşılaşılan değişik zeminlerin elastisite modüllerini temsil eder (Şekil 1). Formüle, ilk dört tabakanın kalınlığı sabittir. Bu kalınlıklar 2, 4, 6 ve 8 m'dir. Sonuncu tabakanın kalınlığı ise isteğe bağlıdır. Vaka çalışmamızdaki tabakaların formüle belirtilen tabakalara interpolate edilmeleri gereklidir. Bu interpolasyon işleminden sonra elde edilen tabaka zemin modülleri Şekil 2'de verilmektedir. Referans çalışmada, sondaj kuyusu boyunca plaka yükleme deneyinden kumlu kil için elde edilen drenajsız 30 MPa'lık zemin modülü değeri 0.75 ile çarpılarak drenajlı modüle geçiş yapılmıştır (Kay ve Cavagnaro, 1983). Bu değer (23 MPa) değiştirilmeden 1. ve 2. formül tabakası için kullanılmıştır. Bu durumda E1 ve E2, 23 MPa olmuştur. Kumlu Çakıltaşı için zemin modülü bu malzeme için verilen tipik değerlerin ortalamasından elde edilmiştir (Bowles, 1997). Kumlu çakıltaşı tabakası 3. formül tabakasına rastlamaktadır, dolayısı ile E3= 150 MPa'dır. Kumtaşı için Kay ve Cavagnaro 500 MPa'lık bir zemin modülü değeri kullanmıştır. Kumtaşı tabakası, formüldeki 4. ve 5. tabakaya rastlamaktadır, dolayısı ile E4 = E5 = 500 MPa olarak alınmıştır (Tablo 4, Kolon 4-8).

**Adım 9 (ld'nin tayini):** Referans makalede ortalama yapı basıncı 128 kN/m<sup>2</sup> olarak verilmiştir. Ancak temel yeryüzünden 3 m aşağıdadır. Yapı basıncından 3 m'lik toprak basıncını çıkarılarak, net temel basıncı 128

$kN/m^2 - 3 m \times 17 kN/m^3 = 77 kN/m^3$  olarak bulunur (Kolon 9).

**Adım 10 (Eraft'ın tayini):** Radye betonunun elastisite modülü verilmemiştir. Bu değer 30 000 MPa olarak girilmiştir (Tablo 4, Kolon 10).

**Adım 11 (Eraft'ın tayini):** 5. tabakanın kalınlığı "bed", anakaya olan uzaklıktan 20 çıkarılarak bulunabilir. Referans makalede anakaya derinliği yaklaşık 93 m olarak verilmiştir. Bu durumda 5. tabakanın kalınlığı "bed" 73 m olmaktadır (Tablo 4, Kolon 11).

**Adım 12-16 (po1, po2, po3, po4, po5'in tayini):**

Drenajlı oturma hesabı için Poisson oranı bütün zeminler için 0.35 olarak alınmıştır (Tablo 4, Kolon 11-16).

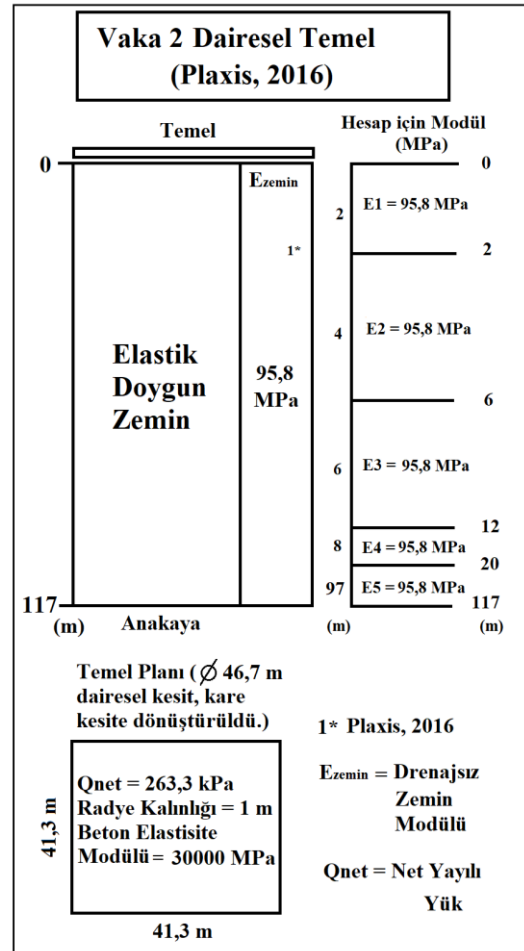
**Tablo 4.** Oturma hesabı için girdiler ve oturma değerleri

	1	2	3	4
Vaka No	wix - radye gen. (m)	wiy - radye uzun. (m)	th - radye kalı. (m)	E1 zemin mod. (kPa)
1	54	27	0,9	23000
2	41,3	41,3	1	95800
	5	6	7	8
Vaka No	E2 zemin mod. (kPa)	E3 zemin mod. (kPa)	E4 zemin mod. (kPa)	E5 zemin mod. (kPa)
1	23000	150000	500000	500000
2	95800	95800	95800	95800
	9	10	11	12
Vaka No	ld - yük (kPa)	Eraft - radye elas. mod. (MPa)	bed = anak. derin. - 20 (m)	po1 Poisson Oranı
1	77	30000	73	0,35
2	263,3	30000	96,75	0,49
	13	14	15	16
Vaka No	po2 Poisson Oranı	po3 Poisson Oranı	po4 Poisson Oranı	po5 Poisson Oranı
1	0,35	0,35	0,35	0,35
2	0,49	0,49	0,49	0,49

### Vaka Çalışması 2'nin Önerilen Formül ile Çözülmesi (Plaxis, 2016)

Günümüzde radye temel oturma hesapları sıklıkla sonlu elemanlar programları ile yapılır

hale gelmiştir. Dolayısı ile önerilen radye temel oturma formülünden elde edilen sonuçların, sonlu elemanlar programlarının verdiği sonuçlar ile ne derece tutarlı olduğu araştırılmalıdır. Bunun için Plaxis 2D ve Plaxis 3D programlarının oturma tahmini doğrulaması için kullandığı silindirik tank oturma modeli, bir kez de önerilen formülle çözülmüştür (Plaxis, 2016). Doğrulama çalışmasında, 46,7 m çapında, zemine 263,3 kPa'lık ortalama basınç uygulayan silindirik bir tank, elastik ve doymun bir zemine oturmaktadır. Vaka çalışması ile ilgili detaylar Şekil 3'de özetlenmektedir. İlgili referansta, Plaxis 2D ve 3D programlarından çıkan oturma değerleri, Lancellota, 2008 tarafından silindirik tanklar için verilen oturma formülü sonucuyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada önerilen formül ile oturma bulunma adımları aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil 3. Vaka Çalışması 2'nin Detayları (Plaxis, 2016)

**Adım 1-2 (wix ve wiy'nin tayini):** Referans çalışmada silindirik tankın çapı 46,7 m olarak verilmiştir. Dairesel kesitin formülde kullanılabilmesi için, dairesel kesit 41,3 m kenar uzunluklu kareye dönüştürülmüştür. Bu yöntemle  $wix = wiy = 41,3$  m olarak bulunmuştur (Tablo 4, Kolon 1 ve 2).

**Adım 3 (th'nin tayini):** Plaxis, 2016'daki örnekte silindirik tankın bir temeli olmadığı, zemin üzerine doğrudan oturduğu varsayılmıştır. Bu varsayımın ana nedeni, Plaxis ile karşılaştırma yapılan elastik yöntemde (Lancellota, R., 2008) temel kalınlığının girilememesidir. Öte yandan bu çalışmada önerilen formüle bir radye kalınlığı girilmelidir. Regresyon analizine dayalı formülün çıkarılışındaki 90 adet kombinasyonun 81'inde 1 m'lik radye kalınlığı kullanılmıştır. Ayrıca formül data havuzundaki en düşük temel kalınlığı 0.5 m'dir (Tablo 3). Normalde tanımsız olan radye kalınlığının girilmesinden dolayı oluşacak sapmaları en aza indirmek için formüle, data havuzunda en sık kullanılan temel kalınlığı girilmiştir ( $th=1$  m, Tablo 4, Kolon 3).

**Adım 4-8 (E1, E2, E3, E4, E5'in tayini):**

$E_1-E_5$  değişik derinliklerde karşılaşılan değişik zeminlerin elastisite modüllerini temsil eder (Şekil 1). Referans çalışmada, 95,8 MPa'lık sabit drenajsız bir zemin modülü verilmiştir. Dolayısı ile  $E_1=E_2=E_3=E_4=E_5 = 95,8$  MPa olarak girilmiştir (Tablo 4, Kolon 4-8).

**Adım 9 (ld'nin tayini):** Referans çalışmada ortalama yapı basıncı 263,3 kN/m<sup>2</sup> olarak verilmiştir (Kolon 9).

**Adım 10 (Eraft'm tayini):** Adım 3'te verilen düşüncelere benzer olarak, tanımsız radye betonu elastisite modülü için formül havuzunda en sık kullanılan 30 000 MPa değeri kullanılmıştır (Kolon 10).

**Adım 11 (Eraft'm tayini):** 5. tabakanın kalınlığı "bed", anakayaya olan uzaklıktan 20 m çıkarılarak bulunabilir. Referans makalede anakaya derinliği yaklaşık 116,75 m olarak verilmiştir. Bu durumda 5. tabakanın kalınlığı "bed" 96,75 m olmaktadır (Kolon 11).

**Adım 12-16 (po1, po2, po3, po4, po5'in tayini):**

Referans çalışmada, suya doymuş drenajsız zeminin oturma hesabı için Poisson oranı bütün

tabakalarda 0,49 olarak alınmıştır (Kolon 11-16).

## Vaka Çalışmasının Sonuçlarının Yorumlanması

Kay ve Cavagnaro, 1983 tarafından iletilen 1. Vakada, Tıbbi bilimler binası için sahada ölçülen oturma değeri 14,5 mm olarak verilmektedir. Önerilen formül ile bu oturma değeri 15,7 mm olarak tahmin edilmiştir. Tahmin edilen değer, ölçülen değerden % 8 sapmıştır.

2. Vaka çalışmasında ise silindirik tankın oturması Plaxis 2D ve Plaxis 3D programlarıyla sırasıyla 74,2 mm, 75,6 mm olarak hesaplanmıştır. 3 Boyutlu sonlu elemanlar çözümüne dayanan formülün verdiği oturma ise 78,0 mm'dir. 3 Boyutlu formülün verdiği değer, Plaxis 3D'nin sonucundan % 3 fazladır. Sonuçların karşılaştırılmasından da görüleceği üzere, önerilen formül ölçülen veya teorik değerlere çok yakın sonuçlar vermektedir.

## Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında 3-Boyutlu sonlu elemanlar analizi tabanlı radye oturma formülü sunulmuştur. Formül, radyenin elastisite modülünü, enini, boyunu, kalınlığını, yayılı yükü ve 5 adet zemin tabakasının zemin modülünü ve Poisson oranını bünyesine almaktadır.

Yapılan bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Formül 3-Boyutlu sonlu elemanlar tabanlı olduğu için oldukça yaklaşık sonuçlar vermektedir.
- Vaka Çalışması 1'de yapımı sırasında oturma ölçümü yapılan bir binaya ait veriler kullanılarak, binanın oturması, önerilen formülle hesaplanmıştır. Drenajlı zemin modüllerinin kullanıldığı Vaka çalışması 1'de formül, ölçülen veriden % 8 sapma göstermiştir.
- Önerilen formül sonuçlarının sonlu eleman programında çıkan sonuçlarla karşılaştırıldığı

Vaka Çalışması 2’de ise Plaxis 3D sonlu elemanlar programı sonucu ile formülün verdiği sonuç arasındaki fark % 3 kadardır.

- Formül ile yukarıda elde edilen oturma miktarları ölçülen ve teorik olarak hesaplanan değerlere çok yakın çıkmışlardır.
- Bu çalışmada sunulan yöntemin radye temellerin oturmasının bulunmasında pratik ve güvenilir bir araç olacağı düşünülmektedir.

## Kaynaklar

- Berardi, R., Jamiolkowski, M. and Lancellotta, R. (1991), “Settlement of shallow foundations in sands selection of stiffness on the basis of penetration resistance”, Proceedings of the Geotechnical Engineering Congress, Boulder, Colorado, U.S.A., June.
- Bowles, J.E. (1997), Foundation Analysis and Design, McGrawHill Inc., New York, U.S.A.
- Burland, J.B. and Burbidge, M.C. (1985), “Settlement of foundations on sand and gravel”, Proc. Inst. Civ. Eng., 78(1), 1325-1381.
- Das, B.M. (1983), Principles of Foundation Engineering, Wadsworth, Inc., Belmont, California, U.S.A.
- Das, B.M. and Nagaratnam, S. (2007), “Settlements of shallow foundations on granular soil-an overview”, Int. J. Geotech. Eng., 1(1), 19-29.
- DeBeer, E.E. (1965), “Bearing capacity and settlement of shallow foundations on sand”, Proceedings of the Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, Duke University, Durham, North Carolina, U.S.A., April.
- DIANA FE User’s Manual (2014), Release 9.5, TNO DIANA BV, The Netherlands.
- Erzİn, Y. and Gul, T.O. (2013), “The use of neural networks for the prediction of the settlement of pad footings on cohesionless soils based on standard penetration test”, Geomech. Eng., 5(6), 541-564.
- Giroud, J.P. (1972), “Settlement of rectangular foundation on soil layer”, J. Soil Mech. Found. Div., 98(SM1),149-154.
- Hamderi, M. (2019), “Footing Settlement Formula Based on ulti-Variable Regression Analyses”, Geomechanics and Engineering, 17(1), 11-18.
- Janbu, N., Jerrum, L. and Kjaemli, B. (1956), Vetledning ved Losning au Fundamentering Soppgauer, Norwegian Geotechnical Institute, 16.
- Kay, N. and Cavagnaro, R.L. (1983), “Settlement of raft foundations piles”, J. Geotech. Eng., 109(11), 1367-1382.
- Lancellotta, R. (2008). Geotechnical engineering. Balkema.
- Lutenegger, A.J. and Degroot, D.J. (1995), “Settlement of shallow foundations on granular soils”, Report of research conducted for Massachusetts Highway Department transportation research project, Contract #6332, Task Order #4.
- Mayne, P.W. and Poulos, H.G. (1999), “Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations”, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 125(6), 453-460.
- Meyerhof, G.G. (1956), “Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils”, J. Soil Mech. Div., 82(SM1), 1-12.
- Mir, M., Bouafia, A., Rahmani, K. and Aouali, N. (2017), “Analysis of load-settlement behaviour of shallow foundations in saturated clays based on CPT and DPT tests”, Geomech. Eng., 13(1), 119-139.
- Mohamed, F.M.O., Vanapalli, S.K. and Saatcioglu, M. (2013), “Generalized Schmertmann Equation for settlement estimation of shallow footings in saturated and unsaturated sands”, Geomech. Eng., 5(4), 343-362.
- Plaxis 2016, Validation - Flexible tank foundation on elastic saturated soil, <https://www.plaxis.com/support/verifications/flexible-tank-foundation-on-elastic-saturated-soil/>
- Schmertmann, J.H. (1970), “Static cone to compute static settlement over sand”, J. Soil Mech. Found. Div., 96(SM3), 1011-1043.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948), Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, New York, U.S.A.

## New method for estimating Raft Foundation Settlement

### Extended abstract

In the past century, numerous formulas have been offered for the settlement prediction of foundations. Based on their approaches, these formulas can be categorized into 3 groups: 1-)Elastic approaches, (Janbu et al., 1956, Grioud, 1972, Das, 1983, Mayne and Poulos, 1999, Bowles, 1987, Mohamed et al., 2013), 2-) SPT- based approaches, (Terzaghi and Peck, 1948, Meyerhof, 1956, Burland and Burbidge, 1985, Erzin and Gul, 2013), 3-) CPT- based approaches, (De Beer, 1965, Schmertmann, 1970, Berardi et al., 1991, Mir et. al., 2017).

Lutenegger ve Degroot, 1995 obtained settlement values from foundation loading tests in the University of Texas A & M. They compared these settlement values with the settlements predicted by various settlement formulas. As for the formula load input, they used a load level that produced 25 mm settlement in the actual test. The deviations of the settlement prediction turned out to be 67 % and 113 %, when SPT and CPT based formulas respectively were used. According to comparison, the difference between the measured and predicted results indicates a major problem with the accuracy of the current approaches. Similarly, Das and Nagaratnam, 2007, reported that the current formulas overestimate the settlements, whereas they underestimate the allowable soil pressures.

Current raft settlement formulas adopt an elastic approach, and they usually don't allow the inclusion of multiple soil layers. Nowadays, engineers employ 3-dimensional finite element analyses in order to enhance the accuracy of their settlement predictions. By employing a 3-dimensional finite element approach, Hamderi, 2019 created a settlement database for 90 different finite element model combinations. Using this database, Hamderi, 2019 derived a settlement formula, which included the dimensions and the elastic modulus of a rectangular raft, vertical uniform pressure and soil moduli and Poisson's ratios up to 5 layers. In the scope of this study, formula was applied to two well-document case studies.

The first case study reported by Kay and Cavagnaro, 1983 includes the settlement measurements of the Medical Science Building built in 1979, Adelaide, South Australia. The building has 9 floors including the ground and basement. The building is seated on a 55 m x 30 m raft with a 0.9 m thickness. The reference study reports a building load of 128 kPa

on the ground, whereas the net pressure becomes 77 kPa with the exclusion of the pressure due to the foundation depth of 3 m. A layer of sandy clay with 6 m thickness underlays the foundation. Beneath this layer, there is a sandy gravel layer with 6 m thickness. Finally, the sandy gravel layer is followed by a sandstone layer which is 78 m in thickness. In summary, the firm bedrock is reached at the depth of 90 m below the foundation level. CPT and Downhole Plate Loading Test (DHPL) have been performed in the site. The depth of these tests are only 10 m therefore, the rest of the soil profile has been obtained from the general geological profile. In the reference study, the DHPL results have been used to calculate the undrained soil modulus of the sandy clay. By multiplying this value by 0.75, it is converted to drained modulus (Kay and Cavagnaro, 1983). The soil modulus of the sandy gravel layer has been determined using the charts reported by Bowles, 1997. The soil modulus of the sandstone is provided by the reference study by Kay and Cavagnaro, 1983. Using such input parameters, formula gave a settlement result about 8 % greater than the observed value. In the second case study, the formula results have been compared with the ones obtained from finite element programs, Plaxis 2D and Plaxis 3D. The verification example of the Plaxis program, "The flexible tank foundation on elastic saturated soil" has been recalculated by the offered formula. In the Plaxis example, a cylindrical tank is seated on a uniform elastic undrained soil. All the input parameters for the formula were straight forward, expect that the thickness and elastic modulus of the raft below the tank were undefined. In the offered formula, these values were taken as the most frequently used values in the process of formula derivation. Namely, a thickness of 1 m and an elasticity modulus of 30 GPa were used for the raft. Finally, the difference of the formula and Plaxis 3D results ended up being 3 %.

The following conclusions can be drawn from the study:

- The settlement formula is quite accurate, because it is based on 3D Finite Element results.
- The formula achieved an 8 % deviation in the first case study, whereas the deviation was only 3 % in the second case.
- It is believed that the offered settlement formula will be a good alternative for finite element based settlement calculations.

**Keywords:** soil, raft foundation, settlement, footing formula

## Ekler

### Formülün Türetilme Aşamaları

Formülün türetilme aşamaları Hamderi, 2019'de detaylı olarak verilmiştir. İlk adım olarak, bir grup giriş parametresi (wix, wiy, bed,... th, Ec) 2-20 sütunlarına girilir (Tablo 1A). Bu grup için DIANA'dan elde edilen oturma değeri sütun 21'ya girilir. Bir sonraki adım, birinci grubun bir değerini değiştirmek ve yeni grup için DIANA'yı kullanarak başka bir oturma değeri elde etmektir. Ardından, ikinci grup giriş parametrelerine karşılık gelen oturma değeri ardışık sırada sütun 21'ya girilir. Bu prosedür, yeterli miktarda sonlu eleman tabanlı oturma verisi elde edilene kadar yaklaşık doksan kez tekrarlanır. Bir sonraki adım, oturma formülünü (Eşitlik 1) sütun 22'ye girmektir. Bu durumda, sütun 22, 2-20 ve 24-39 sütunlarına bağımlı hale gelir. Bu prosedür yaklaşık 90 kez tekrarlanır. Hücre 24-39'daki değerlerin "1" gibi bir başlangıç değerine sahip olması gereklidir,

böylece sütun 22'de gerçek bir sayı belirir. Sonuç olarak, 90 adet sonlu elemanlar tabanlı ve 90 adet formüle dayalı oturma değerlerinden oluşan bir veri kümesi elde edilir (Bu değerler henüz itere edilmemiş ve düzeltilmemişlerdir). Bir sonraki adım, bu iki oturma değeri arasındaki farkın karesini sütun 23'e girmektir. Bu değer bizim "hatamız" olacaktır. Son olarak, sütun 23'deki hatalar alt alta toplanır ve global bir hata değeri bulunur. Şimdi hedefimiz, 24-39 sütunlarında verilen birimsiz katsayıları değiştirerek global hata değerini en aza indirmektir. Excel'deki "Çözücü eklentisi" sayesinde, bu birimsiz katsayılar otomatik olarak iterasyon ile belirlenir. Paylarında birimli parametreler bulunan parantezleri birimsiz yapmak için paydaya birimli sabitler eklenmiştir. Bu yöntemle birimsiz hale gelen parantez ifadeleri, metre birimli "Sb" katsayısı ile çarpılarak metre birimli "S" oturması hesaplanır.

**Tablo 1A.** Formülün türetildiği Excel® dosyasının genel görünümü

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
No	wix (m)	wiy (m)	bed (m)	th (m)	E <sub>1</sub> (MPa)	E <sub>2</sub> (MPa)	E <sub>3</sub> (MPa)	E <sub>4</sub> (MPa)	E <sub>5</sub> (MPa)	p <sub>01</sub>	p <sub>02</sub>
1	20	20	30	1	20	20	20	20	20	0.3	0.3
....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
p <sub>03</sub>	p <sub>04</sub>	p <sub>05</sub>	ld (kPa)	Ec (MPa)	bed (m)	th (m)	Ec (MPa)	DIANA Oturma (m)	Formül Oturma (m)	21 ve 22'nin farkının karesi	
0.3	0.3	0.3	100	10000	50	1	10000	x.xx	?	?	
....	....	....	....	....	....	....	....	....	?	?	
....	....	....	....	....	....	....	....	....	?	?	
23'ün Toplamı--->										?	
24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
S <sub>b</sub>	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
36	37	38	39								
l	m	n	o								
?	?	?	?								



# Yük Taşımacılığında Tek Türlü ve Çok Türlü Taşımacılık Rotalarının Karbon Ayak İzinin Karşılaştırılması

**Ömer Faruk CANSIZ**

İskenderunTeknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay  
[ofcansiz@iste.edu.tr](mailto:ofcansiz@iste.edu.tr) ORCID: 0000-0001-6857-2513, Tel: (326) 613 50 00

**Kevser ÜNSALAN\***

İskenderunTeknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay  
[kevser.keskin@iste.edu.tr](mailto:kevser.keskin@iste.edu.tr) ORCID: 0000-0002-9163-4855, Tel: (326) 613 50 00

Geliş: 21.05.2019, Revizyon: 18.07.2019, Kabul Tarihi: 05.09.2019

## Öz

Günümüzün en önemli çalışma alanlarından biri küresel ısınma ve küresel ısınmanın etkileridir. Küresel ısınmayı tetikleyen faktörlerin başında çevresel katı, sıvı, gaz atıklar ve yeşil alanların tahribi gelmektedir. Bu çalışma da ulaştırma sektöründeki CO<sub>2</sub> salınımı, ulaşım rotalarına göre karşılaştırılmaktadır. Yaygın olarak yapılan tek türlü taşımacılık ile çok türlü taşımacılık karşılaştırılmaktadır. Çalışma Türkiye'nin İskenderun ilçesinden diğer tüm illere 5, 10 ve 14 ton yükün taşınmasını esas almaktadır. Bu yük tonajları Hatay'da üretimi yaygın ve ihracat potansiyeli yüksek olan filtre malzemesinin türüne bağlı olarak minimum, maksimum ve orta seviyede yük tonajlarını belirtmekte ve veriler filtre fabrikasından alınmaktadır. Burada farklı yük tonajlarının minimum CO<sub>2</sub> salınımı açısından taşımacılık türü seçimini ne derece etkilediği araştırılmaktadır. Çıkan sonuçlar ışığında çok türlü taşımacılık rotasının kullanılması ile ülkemizde yaygın olarak yapılan tek türlü taşımacılıktaki özellikle karayolu taşımacılığındaki, fazla CO<sub>2</sub> salınımı azaltılabilmektedir. Çok türlü taşımacılık ile tek türlü denizyolu ve demiryolu taşımacılığının yapılamadığı bölgelere, daha çevreci taşımacılık yapılabilmektedir. Yapılan analizlere göre çok türlü taşımacılık rotalarının 5 ton yük için verimli olduğu il yüzdesi %60, 10 ton yük için %63, 14 ton yük için ise %66 çıkmaktadır. Böylece Türkiye coğrafyası düşünüldüğünde, çok türlü taşımacılığın tek türlü taşımacılığa göre CO<sub>2</sub> emisyonu yönünden daha avantajlı olduğu, çevreye daha az sera gazı salınımının gerçekleştiği görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Emisyon, yük taşımacılığı, çok türlü taşımacılık, tek türlü taşımacılık

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Dünya'da nüfus artışına paralel olarak insanoğlunun dünyaya verdiği zararda artmaktadır. Dünyanın sonunu getirecek tahribatların başında küresel ısınma gelmektedir. Son dönemlerde küresel ısınma etkilerinin ciddi bir şekilde hissedildiği dünyada bu konuda geniş çaplı araştırmalara öncelik verilmektedir. Tüm sektörler için sera gazı emisyonu ciddi bir araştırma konusu olmaktadır. Diakoulaki ve Mandaraka (2007), ayrışma analizi ile endüstriyel CO<sub>2</sub> salınımindaki yıllara göre ve 14 Avrupa Birliği ülkesindeki değişimlerini incelemektedir. Taşımacılık sektörü, küresel enerji tüketiminin ve enerjiyle ilgili karbon emisyonlarının yaklaşık dörtte birini oluşturmaktadır (Batur ve ark. (2019)). Van Fan ve ark. (2018) çevresel sürdürülebilirlik için ulaştırma sektöründe hava kirleticileri dikkate almaktadır. Taşıma türü seçimine göre modeller geliştirmekte ve bu modellerin güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koymaktadır. Çin'de ulaşım sektörü, karbon emisyonu ve enerji yönetimi açısından büyük öneme sahiptir. Wang ve ark. (2018) karbon emisyon yoğunluğunu azaltmaya yönelik Genelleştirilmiş Divisia Endeks Yöntemini (GDIM) ile analiz yapmaktadır.

Xiao ve ark. (2018), birçok kuruluşta ulaştırma politikalarının sadece maliyet tabanlı geliştirilmesinden ziyade aynı zamanda karayolu taşımacılığı emisyonunun dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Dayı ve Çelikten (2018), Türkiye için ulaştırma politikalarının düzenlenmesinde önemli role sahip taşıt sayısı ve buna bağlı olarak 2030 yılına kadar emisyon yükü tahmini üzerine çalışmaktadır. Tahmin denklemlerini Microsoft Office-Excel programı üzerinden oluşturmaktadır. Xie ve ark. (2017), kentteki karbon emisyon miktarı ve yoğunluğunu arttıran sebepleri ulaşım altyapısı, teknolojik yenilik etkisi, ekonomik büyüme ve nüfus ile bağdaştırmaktadır. Palander (2017) çalışmasında karayolunda kereste taşımacılığı üzerine yük tonajı ve rota kriterlerini değiştirerek araçlardaki CO<sub>2</sub> emisyonunu karşılaştırmaktadır.

Yük ve yolcu taşımacılığında emisyon miktarlarının azaltılmasına yönelik yeni çalışmalar ve politikalar geliştirilmektedir (Tang ve ark., 2017). Yang ve Chen (2017), çalışmalarında emisyon vergisinin çıkartılması ile emisyon miktarının düşürülebileceğini araştırmaktadır. Zhang ve ark. (2018) çalışmalarında yoğun trafiğin yaşandığı Çin'in Nanjing bölgesindeki trafiğin yarattığı karbondioksit salınımını azaltmaya yönelik akıllı ulaşım sistemi veri envanterinden faydalanmaktadır. Kishimoto ve ark. (2017), çalışmasında Çin'de ulaştırmadaki CO<sub>2</sub> salınım fiyatlandırmasının artırılması ve karayolu taşımacılığı emisyon standartlarının tam anlamıyla uygulanması ile toplam emisyon miktarının azaltılmasında rol oynayacağını savunmaktadır. Batur ve ark. (2019), Türkiye'nin en kalabalık şehri olan İstanbul kenti için ulaşım sektöründeki enerji tüketimi ve emisyon miktarlarının mevcut durumu ve gelecek durumu için senaryo çalışmaları yapmakta ve alınacak önlemlerin beraberinde enerji kaynaklarının tüketiminin ve çevre kirleticilerin azalacağı yönünde tespitlerde bulunmaktadır. Pabuçcu ve Bayramoğlu (2016), çalışmalarında Türkiye için Yapay Sınır Ağları Yöntemini kullanarak emisyon tahmini yapmaktadır. Elde ettiği sonuçları Türkiye'nin 2030 yılı için Paris İklim Zirvesi'nde sözleşmeyle taahhüt ettiği değerlerle karşılaştırmaktadır.

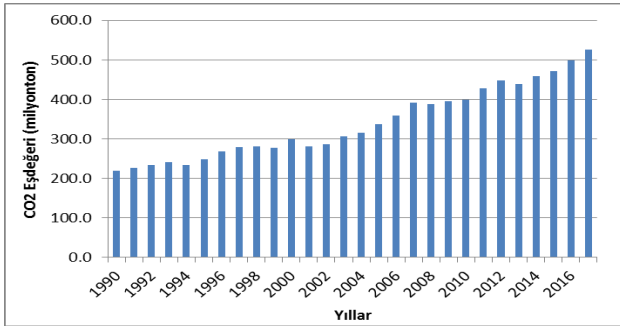
Bu çalışmada ulaşım sektöründen kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyon miktarları, ulaşım rotalarındaki ulaşım türlerine göre incelenmektedir. Çalışmada karşılaştırma yapabilmek için Türkiye'nin Hatay ilinden, Türkiye'nin diğer tüm illerine yük taşındığı kabul edilmektedir. Burada amaç, üç tarafı denizlerle kaplı ve belli demiryolu altyapısına sahip Türkiye'de, ulaşım coğrafyasının, en düşük karbon salınımına göre rota seçimini ne yönde etkilediğini araştırmaktır.

## Türkiye'nin Karbon Ayak İzi Göstergeleri

Dünya'da gün geçtikçe ekonomik ve sosyal platformda hızlı büyümeler, çevresel kirlilik artışını da beraberinde getirmektedir. Bu da



ülkeler arasında bazı anlaşmaların yapılmasını zorunlu hale getirmektedir. 2015 yılında Paris İklim Zirvesi'nde Türkiye'nin de aralarında bulunduğu 196 ülke ile birlikte sözleşmeler imzalanmıştır. Türkiye'nin yaptığı bu anlaşma ile çevre politikalarını kontrol altında tutması gerekmektedir (Pabuçcu ve Bayramoğlu (2016)). Şekil 1'de Türkiye'nin 1990 ve 2017 yılları arasında tüm sektörler için eşdeğer CO<sub>2</sub> salınım miktarları görülmektedir. 1990'dan 2017'ye doğru istikrarlı bir artış olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Türkiye'nin 1990-2017 yılları arasındaki sera gazı emisyon istatistikleri (TÜİK (2019))

Paris İklim Zirvesi'nde Türkiye geliştireceği politikalar ile 2020-2030 yılları arasında emisyon oranında %21 azalmaya gidileceğini öngörmektedir (Pabuçcu ve Bayramoğlu (2016)). İstikrarlı emisyon artışına bakıldığında çevre politikalarında düzenlemeye gidilmesi gerektiği görülmektedir.

## Materyal ve Yöntem

Çalışmanın birinci aşamasında öncelikle Hatay'dan tüm illere her bir taşımacılık türü için minimum mesafede tek türlü taşımacılık güzergâh rotaları belirlenmektedir. Daha sonra demiryolu ve denizyolu taşımacılığı ağırlıklı olmak üzere çok türlü taşımacılık rotaları çıkartılmaktadır. Tablo 1'de rotalar içerisinde bulunan ulaşım türleri görülmektedir. Tabloda ro, ra, se ve fe göstergeleri sırasıyla karayolu, demiryolu, denizyolu ve feribot taşımacılığını göstermektedir. Çok türlü güzergâh rotalarında demiryolu ve denizyolu ağırlıklı taşımacılığın yapılmasındaki amaç, karayolu üzerindeki trafik

yoğunluğunun azaltılması ayrıca karayolu taşıtlarının diğer ulaşım türü taşıtlarına kıyasla daha fazla CO<sub>2</sub> salınımı yapmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 1. Hatay ve diğer iller arasında oluşturulan rotalar ve rotaları oluşturan ulaşım türleri

	1. rota	2. rota	3. rota	4. rota	5. rota
Adana	ro	ra			
Adıyaman	ro	ra	ra+ro		
Afyonkarahisar	ro	ra	ra+ro	se+ro	se+ro+ra
Ağrı	ro	ra+ro	ra+ro	ra+ro	
Aksaray	ro	ra+ro			
Amasya	ro	ra	ra+ro	ro+ra	
Ankara	ro	ra	ra+ro	ra+ro	ro+ra
Antalya	ro	se	ra+ro	ra+ro	ra+ro
Ardahan	ro	ra+ro	ra+se+ro		
Artvin	ro	ra+ro	ra+se+ro		
Aydın	ro	ra	se+ra	se+ro	se+ro+ra
Bahçeşehir	ro	ra	se	se+ra	ra+se
Bartın	ro	ra+ro	se+ra+ro		
Batman	ro	ra	ra+ro		
Bayburt	ro	ra+se+ro	ra+ro	ra+ro	
Bilecik	ro	ra	se+ro	se+ra	
Bingöl	ro	ra+ro	ra+ro	ra+ro	
Bitlis	ro	ra	ra+ro		
Bolu	ro	ra+ro	ra+ro	se+ro	
Burdur	ro	ra	se+ro	ra+ro	
Bursa	ro	se	ra+ro	se+ra+ro	
Çanakkale	ro	ra+ro	se+ro	se+ro	
Çankırı	ro	ra	se+ra		
Çorum	ro	ra+ro	ra+ro		
Denizli	ro	ra	se+ro	se+ra	ra+ro
Diyarbakır	ro	ra	ra+ro	ra+ro	
Düzce	ro	ra+ro	se+ro	ra+ro	se+ra+ro
Edirne	ro	ra	ra+se+ro	se+ra	
Elazığ	ro	ra	ra+ro		
Erzincan	ro	ra	ra+ro	se+ro	
Erzurum	ro	ra	ra+ro	se+ro	
Eskişehir	ro	ra	se+ra	se+ra	
Gaziantep	ro	ra			
Giresun	ro	ra+ro	se+ro	ra+ro	
Gümüşhane	ro	ra+ro	se+ro		
Hakkâri	ro	ra+ro	ra+ro	ra+ro	
İğdır	ro	ra+ro	ra+ro		
İsparta	ro	ra	se+ro	ra+ro	se+ra
İstanbul	ro	ra	se	se+ra+se	se+ro+ra
İzmir	ro	se	ra	se+ro	
Kahramanmaraş	ro	ra			
Karabük	ro	ra	se+ra	se+ro	
Karaman	ro	ra	se+ra		
Kars	ro	ra	ra+se+ro		
Kastamonu	ro	ra+ro	se+ra+ro	ra+ro	
Kayseri	ro	ra			
Kırıkkale	ro	ra	se+ra	se+ro	
Kırklareli	ro	ra	se+ra	ra+se+ro	
Kırşehir	ro	ra+ro			
Kilis	ro	ra+ro			
Kocaeli	ro	ra	se	se+ra	se+ra
Konya	ro	ra	se+ro	se+ra	

Tablo 1. (devam) Hatay ve diğer iller arasında oluşturulan rotalar ve rotaları oluşturan ulaşım türleri

	1. rota	2. rota	3. rota	4. rota	5. rota
Kütahya	ro	ra	se+ra	se+ro+ra	
Malatya	ro	ra			
Muğla	ro	ra+ro	se+ro	se+ra+ro	

Muş	ro	ra			
Nevşehir	ro	ra+ro			
Niğde	ro	ra			
Ordu	ro	ra+ro	se+ro	ra+ro	ra+ro
Osmaniye	ro	ra			
Rize	ro	ra+ro	ra+ro	se+ro	ra+se+ro
Sakarya	ro	ra	se+ra	ra+se+ra	ra+se+ro
Samsun	ro	ra	se	ra+ro	
Siirt	ro	ra	ra+ro		
Sinop	ro	ra+ro	se+ro		
Sivas	ro	ra	ra+ro		
Şanlıurfa	ro	ra+ro			
Şırnak	ro	ra+ro	ra+ro		
Tekirdağ	ro	ra	se	se+ro+ra	ra+se
Tokat	ro	ra	ra+ro		
Trabzon	ro	se	ra+ro	ra+ro	ra+se
Tunceli	ro	ra+ro	ra+ro		
Uşak	ro	ra	se+ra	se+ro+ra	
Van	ro	ra+ro	ra+ro	ra+fe	
Yalova	ro	ra+ro	ra+ro	se+ro	
Yozgat	ro	ra	ro+ra		
Zonguldak	ro	ra	se+ro		

100 km yol için taşımacılık türlerindeki taşıta bağlı olarak hesaplanan CO<sub>2</sub> salınım miktarları Tablo 2’de görülmektedir. 100 km başına düşen emisyon miktarları incelendiğinde en fazla emisyonun karayolu taşımacılığında olduğu görülmektedir.

**Tablo 2.** 100 km yol için farklı yük tonajlarında ve farklı taşımacılık türlerine bağlı olarak CO<sub>2</sub> salınım miktarları

Karayolu			Demiryolu			Denizyolu
5 t	10 t	14 t	5 t	10 t	14 t	Konteyner Başı
37.78 g	151.1 g	219.128 g	5.5 g	22 g	43.12 g	19.43 g

Tablodaki 100 km başına hesaplanan emisyon değerleri Eşitlik 1, 2, 3’e göre hesaplanmaktadır. Ulaşım türlerine bağlı olarak emisyon miktarı karayolu ve demiryolu için Eşitlik 1 ve denizyolu için eşitlik 3’e göre hesaplanmaktadır (Atar, 2013).

$$E = YM \times D \times EF \quad (1)$$

Eşitlik 1 de YM, D ve EF sırasıyla yük miktarı, taşıma mesafesi ve ton başı CO<sub>2</sub> emisyon faktörüdür. Emisyon faktörünün formülü ise eşitlik 2’de verilmektedir.

$$EF = T \times Km \times e / (1000000) \quad (2)$$

Formüldeki T yük miktarı, km taşıma mesafesi ve e ton-km başı gram cinsinden CO<sub>2</sub> emisyon miktarıdır. e değeri karayolu taşımacılığında 5 ve 10 ton yük birimleri için 151.1 g, 14 ton yük

için ise 111.8 g ve demiryolu taşımacılığı için tüm yük birimlerinde 22 g alınmaktadır (www.cefic.org).

$$E = t \times P \times EF \times makine \text{ yükü} \quad (3)$$

Eşitlik 3’te denizyolu taşımacılık türü için denklem verilmektedir. Denklemde t değeri, geminin seyirde, limanda ve manevradaki zaman dilimidir. P değeri ise geminin bu zaman dilimindeki kullandığı makinelerin güçleridir. Formüldeki EF değeri ise gemi türü ve emisyon türüne bağlı olarak emisyon çarpanıdır. Son olarak makine yükü değeri ise makinelerin ilgili çalışma türündeki yüzde makine gücüdür.

Geminin ana makine gücü 1610 kW, yardımcı makine gücü 165 kW ve jeneratörlerin gücü ise 47 kW alınmaktadır. Ana makine yükü gemi seyir halindeyken %80, manevrada ise %40’tır (Atar, 2009). Geminin manevra süresi iki saat alınmaktadır (Atar vd. (2013)). Geminin manevra süresi iki saat kabul edilmektedir. Bir yük gemisi en fazla 18000 konteyner taşıyabilmektedir. Bu çalışmada yük gemisinin 10000 adet konteyner taşıdığı kabul edilmekte ve konteyner başı emisyon değeri buna göre hesaplanmaktadır. EF değeri kuru yük gemileri için seyirde 672 g/kWh, limanda 723 g/kWh, manevrada 730 g/kWh alınmaktadır (Kılıç, 2009).

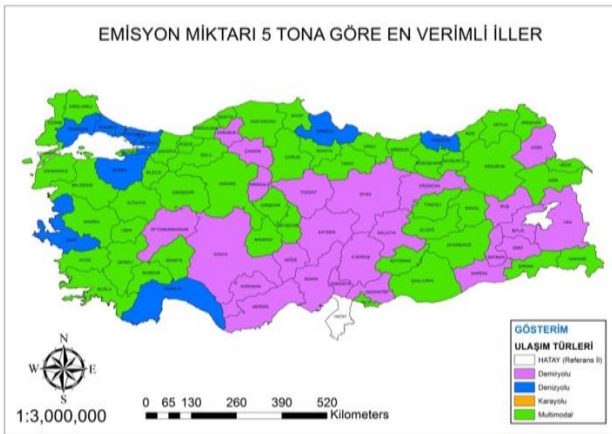
## Bulgular ve Tartışma

Üç farklı yük birimine göre tüm güzergah rotalarının emisyon miktarları belirlenen denklemlere göre hesaplanmaktadır. Hesaplanan emisyon miktarlarına göre iki şehir arasındaki taşımacılık rotaları birbiri ile karşılaştırılmakta ve en az CO<sub>2</sub> salınımının gerçekleştiği ulaşım türü belirlenmektedir. Ayrıca yük tonajının etkisini de görebilmek amacıyla her yük tonajı kendi içerisinde değerlendirilmektedir. Tablo 3’te karayolu yakınlık mesafesine göre minimum karbondioksit salınımının gerçekleştiği rota türleri görülmektedir. Uzaklığın ve yük tonajının artışı ile beraber çok türlü taşımacılık avantajlı duruma gelmektedir.

**Tablo 3.** Hatay ve diğer iller arasındaki karayolu uzaklığına göre minimum CO<sub>2</sub> salınımının gerçekleştiği rotalardaki ulaşım modlarının dağılımı

km aralıkları		0-300	301-600	601-900	901-1300
5 ton	karayolu	0	0	0	0
	demiryolu	6	8	9	1
	denizyolu	0	0	2	6
	multimodal	1	8	24	15
10 ton	karayolu	0	0	0	0
	demiryolu	6	8	7	1
	denizyolu	0	0	2	6
	multimodal	1	8	26	15
14 ton	karayolu	0	0	0	0
	demiryolu	6	7	6	1
	denizyolu	0	0	2	6
	multimodal	1	9	27	15
toplam il sayısı		7	16	35	22

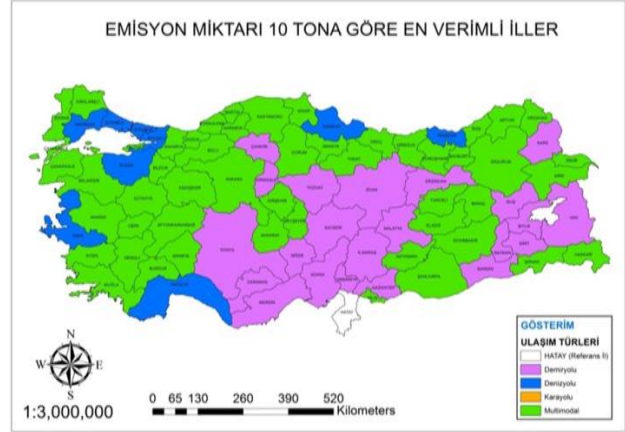
Belirlenen minimum emisyon miktarının hesaplandığı ulaşım türleri ArcGIS programına girilerek Şekil 2, 3 ve 4'teki haritalar elde edilmektedir.



*Şekil 2. Hatay'dan Türkiye'nin tüm illerine 5 ton yükün taşınmasında minimum emisyonun hesaplandığı ulaşım türleri*

Şekil 2'de illere göre en az karbondioksit salınımının yapıldığı güzergâhların hangi tür taşımacılığa ait olduğu verilmektedir. 5 ton yükün taşınmasında 8 ilde denizyolu, 24 ilde demiryolu ve 48 ilde ise çok türlü taşımacılık güzergâhında minimum karbondioksit salınımı hesaplanmaktadır. Görüldüğü gibi karayolu taşımacılığının CO<sub>2</sub> salınımı bakımından diğer türlere göre uygun çıktığı il yoktur. Bu nedenle karayolu ile yapılan taşımacılığın diğer türlere

kıyasla daha çok hava kirliliğine yol açtığı söylenebilmektedir. 5 ton yükün taşınmasında Türkiye geneli 48 verimli il sayısı ile Türkiye'nin %60'ında çok türlü taşımacılık en çevreci çıkmaktadır.



*Şekil 3. Hatay'dan Türkiye'nin tüm illerine 10 ton yükün taşınmasında minimum emisyonun hesaplandığı ulaşım türleri*

10 ton yükün taşınmasında Şekil 3'de emisyon miktarları incelendiğinde 8 ilde denizyolu taşımacılığı, 22 ilde demiryolu taşımacılığı, 50 ilde ise çok türlü taşımacılık ile en az karbondioksit salınımı gerçekleşmektedir. Yük tonajı 5 tondan 10 tona çıkartılınca Karabük ve Afyonkarahisar'da çok türlü taşımacılık ile demiryolu taşımacılığına göre daha az karbondioksit salınımı hesaplanmaktadır. Karbondioksit salınımına göre 10 ton yükün taşınmasında 50 ilde çok türlü taşımacılık en efektif güzergâh çıkmakta ve Türkiye'nin %62,5'inde etkili olmaktadır.



*Şekil 4. Hatay'dan Türkiye'nin tüm illerine 14 ton yükün taşınmasında minimum emisyonun hesaplandığı ulaşım türleri*

14 ton yükün taşınmasında emisyon değerlerinin minimum çıktığı taşımacılık türleri Şekil 4'te verilmektedir. Haritaya göre 8 ilde denizyolu taşımacılığı ile en az karbondioksit salınımı yapılmaktadır. Demiryolu taşımacılığının efektif olduğu iller incelendiğinde 10 ton yük için il sayısı 22 iken yük tonajı 14 tona çıktığında il sayısı 19'a düşmektedir. Çok türlü taşımacılıkta ise yük 10 tondan 14 tona çıkınca il sayısı 50'den 53'e yükselmektedir. Buradan anlaşılacağı gibi yük tonajı arttıkça çok türlü taşımacılık, diğer türlere kıyasla daha çevreci bir rotadır. Üç farklı tonajda emisyon haritaları incelendiğinde ise karayolu taşımacılığı efektif çıkmamaktadır. Bu da karayolu taşımacılığının karbondioksit salınımı bakımından oldukça elverişsiz bir taşımacılık türü olduğunu ispatlar niteliktedir.

**Tablo 4.** Farklı yük tonajlarına göre yapılan taşımacılıklarda CO<sub>2</sub> salınımının minimum olduğu taşımacılık türlerindeki il sayısı

yük miktarı	Ulaşım türüne bağlı olarak minimum emisyon miktarının hesaplandığı il sayısı			
	Karayolu	Demiryolu	Denizyolu	Çok Türlü
5 ton	0	24	8	48
10 ton	0	22	8	50
14 ton	0	19	8	53

Tablo 4'te görüldüğü gibi yük ağırlığı arttıkça çok türlü taşımacılık ile demiryolu taşımacılığına kıyasla daha az CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleşmektedir. Bunun nedeni ise çok türlü taşımacılık içerisinde denizyolu kombinasyonundan kaynaklanmaktadır. Denizyolu taşımacılığının sabit kalmasının nedeni ise sadece 8 liman, güzergâhlar oluşturulurken hesaba katılmaktadır.

## Sonuç

Ulaşım modlarında kullanılan taşıt tipine bağlı emisyon miktarları incelendiğinde Türkiye geneli her yük birimi için en verimli taşımacılık modu çok türlü çıkmaktadır. Çok türlü taşımacılığın 5 ton için verimli olduğu il yüzdesi %60, 10 ton yük için %63, 14 ton yük için ise

%66 çıkmaktadır. Bu da çok türlü taşımacılığın çevreci bir taşımacılık modu olduğunu ispatlar niteliktedir. Ayrıca yük tonajının artmasına bağlı olarak çok türlü taşımacılığın minimum CO<sub>2</sub> salınımı yaptığı il sayısında artış gözlenmektedir. Çevreye en çok zarar veren taşımacılık türü ise karayolu taşımacılığı çıkmaktadır. Çalışmada yük taşımacılığında karayolu taşımacılığı üzerindeki yoğunluğun başta çok türlü taşımacılık olmak üzere diğer ulaşım türlerine aktarılması ile emisyon salınımı ciddi oranlarda azaltılmaktadır. Çalışma sonuçları göstermektedir ki, tek türlü taşımacılığın olumsuz tarafları çok türlü taşımacılık modu ile bertaraf edilebilmektedir. Ülkemizde son zamanlarda lojistik köylere verilen önemin artması ve buna bağlı olarak lojistik köy altyapısının oluşturulmasına yönelik çalışmalarda artmaktadır. Lojistik köy ve liman altyapılarımızın geliştirilmesi ile çok türlü taşımacılık daha elverişli hale gelecektir. Yani lojistik köy ve liman altyapılarının geliştirilmesi çevreye sera gazı salınımının engellenmesinde yardımcı olacaktır. Ayrıca hükümetlerin ve çeşitli kuruluşların teşviki ve yaptırımları ile bu konuda gerekli iyileştirmelerin yapılması, taşımacılıkta karbon ayak izinin azaltılması yönünde oldukça önemli bir adım olacaktır.

## Kaynaklar

- Atar F (2013). *Kısa Mesafe Deniz Taşımacılığının Avantajları ve Kombine Taşımacılıktaki Önemi*, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Batur İ, Bayram İ S, Koç M (2019). Impact Assessment of Supply-Side and Demand-Side Policies on Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions from Urban Passenger Transportation: The Case of Istanbul, *Journal of Cleaner Production*, 219, 391-410.
- Dayı R, Çelikten İ (2018). 2030 Yılına Kadar Türkiye'de ki Motorlu Taşıt Sayılarının ve Emisyon Yükünün Tahmini, *14th International Combustion Symposium*

- (INCOS2018), 530-539.
- Diakoulaki D, Mandaraka M (2007). Decomposition Analysis for Assessing The Process in Decoupling Industrial Growth from CO<sub>2</sub> Emissions in The EU Manufacturing Sector, *Energy Economics*, 29(4), 636-664.
- Kılıç A (2009). Marmara Denizi'nde Gemilerden Kaynaklanan Egzoz Emisyonları, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2),124-134.
- Kishimoto P N, Karplus V J, Zhong M, Saikawa E, Zhang X (2017). The Impact of Coordinated Policies on Air Pollution Emissions from Road Transportation in China, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 30-49.
- Pabuççu H, Bayramoğlu T (2016). Yapay Sınır Ağları ile CO<sub>2</sub> Emisyonu Tahmini: Türkiye Örneği, *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18/3, 762-778.
- Palander T (2017). The Environmental Emission Efficiency of Larger and Heavier Vehicles-A Case Study of Road Transportation in Finnish Forest, *Journal of Cleaner Production*, 155,57-62.
- Program: ArcGIS 10.1.
- Tang S, Wang W, Cho S, Yan H (2017). Reducing Emissions in Transportation and Inventory Management: (R,Q) Policy with Considerations of Carbon Reduction, *European Journal of Operational Research*, 269, 327-340.
- TÜİK (2019). Sera Gazı Emisyon İstatistikleri.
- Van Fan Y, Perry S, Klemes J J, Lee, C T (2018). A Review on Air Emissions Assesment: Transportation, *Journal of Cleaner Production*, 194, 673-684.
- Wang Y, Zhou Y, Zhu L, Zhang F, Zhang Y (2018). Influencing Factors and Decoupling Elasticity of China's Transportation Carbon Emissions, *Energies*, 11, 1-29.
- Xiao L Y, Dridi M, El Hassani A H, Fei HY, Lin W L (2018). An Improved Cuckoo Search for A Patient Transportation Problem with Consideration of Reducing Transport Emissions, *Sustainability*, 10(3), 1-19.
- Xie, R, Fang, J, Liu C (2017). The effects of Transportation Infrastructure on Urban Carbon Emissions, *Applied Energy*, 196, 199-207.
- Yang H, Chen W (2017). Retailer-driven Carbon Emission Abatement with Consumer Environmental Awareness and Carbon Tax: Revenue-sharing Versus, *Omega*, 78, 179-191.
- İnternet- Guidelines for Measuring and Managing CO<sub>2</sub> Emission from Freight Transport Operations URL: [www.cefic.org](http://www.cefic.org), Son Erişim Tarihi: 20.04.2018
- Zhang S J, Niu T L, Wu Y, Zhang K M, Wallington T J, Xie Q Y, Wu X M, Xu H L (2018). Fine-Grained Vehicle Emission Management Using Intelligent Transportation System Data, *Environmental Pollution*, 241, 1027-1037.

## Comparison of Carbon Footprint of Unimodal and Multimodal Transport Routes in Freight Transport

### Extended abstract

*One of the most important fields of work today is the effects of global warming and global warming. The most important reason of global warming is the destruction of green areas and environmental solids, liquids, gas wastes. In this study, CO<sub>2</sub> emission in transportation sector is compared according to transportation routes. Commonly unimodal transport and multimodal transport routes are compared.*

*In the study, the filter load is carried at 5, 10 and 14 tons load units depending on the filter type. Furthermore, it is explored how different load tonnages affect the route selection in terms of minimum CO<sub>2</sub> emissions.*

*In the light of the results, the use of multimodal mode of transportation can reduce CO<sub>2</sub> emissions in unimodal transport. Multimodal transport and unimodal maritime and rail transport cannot be made to the regions, a more environmentally friendly transportation can be made. When the results are examined according to the determined tonnage of freight, the multimodal transportation routes are effective route 60% for 5 tons, 63% for 10 tons and 66% for 14 tons. This proves that multimodal transport is an environmental transportation mode. In addition, due to the increase in freight tonnage, the preferability of multimodal transportation route is increased in terms of CO<sub>2</sub> emission. The type of transport that causes the most damage to the environment is road transport. The transfer of the density on road freight to other modes of transport, especially in multimodal transport, can significantly reduce CO<sub>2</sub> emissions.*

*The importance given to the logistic villages in our country is increasing recently. Accordingly, the studies on the establishment of logistics village infrastructure are increasing. Multimodal transport will be more convenient with the development of logistics village and port infrastructures. In other words, the development of logistic village and port infrastructures will help to prevent greenhouse gas emissions to the environment. In addition, necessary improvements with the promotion of governments and various organizations and will be a very important step towards reducing carbon footprint in transportation.*

**Keywords:** *Multimodal transport; Route optimization; Unimodal transport; Freight transport*



# Barit Tozu Modifiyeli Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik Özellikleri

**Selim CEMALGİL\***

Munzur Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli

[scemalgil@munzur.edu.tr](mailto:scemalgil@munzur.edu.tr) ORCID: 0000-0001-6475-3632, Tel: (428) 213 17 94 (2434)

Geliş: 10.07.2019, Revizyon: 03.10.2019, Kabul Tarihi: 27.01.2020

## Öz

*Bu çalışmada, barit tozu ile üretilmiş Kendiliğinden Yerleşen Harçların (KYH), kendinden yerleşebilme ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Barit tozu, mineral katkı maddesi olarak ağırlıkça beyaz çimento ile ikame edilmiştir. Toplam çimento ağırlığının %5'i, %10'u, %20'si ve %30'u oranında barit tozundan oluşan karışım ile kontrol karışımı içeren toplamda beş seri KYH tasarımı yapılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.49 oranında sabit tutulmuş olup, karışımdaki beyaz çimento oranı barit tozunun ikame oranına göre  $350\text{kg/cm}^3$  ile  $500\text{kg/cm}^3$  arasında değişiklik göstermiştir. Karışımların KYH standartlarına ve reolojik özelliklere uygunluğunu değerlendirmek için taze harç üzerinde mini V-hunisi, akış zamanı ve mini çökme/yayılma testleri yapılmıştır. Test gününe kadar 7, 28 ve 56 gün boyunca kür havuzunda bekletilen sertleşmiş numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımlarının belirlenmesi için toplam 45 adet  $40\times 40\times 160$  mm numune üretilmiş ve teste tabi tutulmuştur. Kendinden yerleşebilme özellikleri ikame oranı artışıyla her ne kadar düşmüşse bile, EFNARC standardının belirlediği sınırlar arasında kalmıştır. En iyi dayanım sonuçları, kontrol numunelerine kıyasla %10 oranında barit tozu ile beyaz çimentonun ikame edildiği numunelerden elde edilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Kendinden yerleşen harç; beyaz çimento, barit tozu, mekanik özellikler;

\* Yazışmaların yapılacağı yazar:

## Giriş

Doğal ve yapay malzemelerin beton ve harçlarda kullanımı birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve mermerden, bazalta, camdan, katı atıklara kadar birçok doğal, yapay veya atık malzeme farklı özellikleri açısından bilimsel araştırmalara konu olmuştur (Cemalgil ve Onat 2016). Beton ve türevlerinin sektör açısından gelişimini sağlamak için yapılan çalışmalar genellikle rezerv ve bulunabilirlik açısından değerlendirilerek en uygun malzeme üzerinden yapılmaktadır. Beton ve türevleri malzemeleri geliştirmek için rezerv açısından bol malzemelerden biri de Barittir (Gönen ve diğ. 2012). Barit, baryum elementinin en yaygın minerali olan baryum sülfattır ( $BaSO_4$ ). Barit, metalik olmayan minerallerin en ağır olanıdır. Baritin yüksek bir yoğunluğa ( $4.45\text{gr/cm}^3$ ), düşük aşınma özelliğine (Moh's 3-3.5), yüksek sıcaklık ve basınç altında kimyasal dayanıma, su ve asitlerde düşük çözünürlüğe, manyetik özelliklerin eksikliği ve makul maliyetlere sahip olduğu belirtilmektedir. Dünyadaki barit üretiminin %85-90'ı petrol sondajında, sondaj çamuru ağırlığı üretiminde, artık baryum kimyasallarının üretiminde ve dolgu maddelerinde kullanılmaktadır. Barit; boya, kâğıt, plastik, kauçuk, cam, seramik ve sürtünme malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Hem maliyet düşürücü hem de endüstride fonksiyonel dolgu maddesi olarak kullanılır. Türkiye'de çok sayıda barit cevheri yatağı bulunmaktadır ve önemli rezervlere sahip cevher yatakları 9 bölgede toplanmaktadır. Bu bölgeler sırasıyla Alanya-Gazipaşa bölgesi, Konya Isparta bölgesi, Çanakkale Gökçeada, Kocaeli, Osmaniye-Kahramanmaraş, Giresun, Muş, Eskişehir. Barit yatakları Şekil 1'de görülebilir.



Şekil 1. Barit yataklarının Türkiye geneli dağılımı (https1)

En fazla Barit yatağının olduğu Alanya-Gazipaşa bölgesindeki cevher yatakları mercek ve balon şeklinde dolomitik kalkerlerde yoğunlaşmıştır. Paleozoik yaşlı mineralleşmenin boyutları çok çeşitlidir. Gangue mineralleri kuvars, demir, bakır ve kurşun minerallerini içerir. Bu bölgedeki hidrotermal yataklardaki  $BaSO_4$  miktarı %85-98 arasında değişmektedir. Konya-Isparta bölgesindeki barit yatakları, düşük dereceli metamorfizme maruz kalmış, Devoniyen kristal kireçtaşları arasında oluşur. Yataklar bayrak biçimindedir ve bazı yerlerde barit blokları içerir. Özellikle Paleozoik metamorfik seri uzantıları boyunca barit mineralleşmesi gözlenir.  $BaSO_4$  miktarı bu cevher yataklarında %62-%99 arasında değişmekte ve SrO içeriği %0.5-%3.0 arasında değişmektedir. Cevher yataklarındaki  $BaSO_4$  miktarı %90-%99'dur. Cevher yatağındaki  $BaSO_4$  miktarı %72-99 arasında değişmektedir. Bu yataklar dışında Giresun, Kocaeli ve Kütahya illerinde önemli sayılabilecek barit oluşumları vardır (https1). Doğada bulunan Barit Şekil-2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Doğada bulunan Barit (https1)

Türkiye'deki Barit rezervlerinin önemli miktarda olmasıyla birlikte, inşaat sektöründe Barit kullanımı ile ilgili çok az çalışma vardır. Bu kapsamda Topcu (2003), ağır betonda Barit kullanımını araştırmıştır. Optimum su/çimento oranı ve çimento dozu Topcu (2003) tarafından araştırılmış ve Barite ile üretilen ağır betonun optimum su/çimento oranının 0.4 olduğunu ve bu tip beton için en uygun dozajın  $350\text{ kg/m}^3$  olduğu belirtilmiştir. Kılınçarslan ve diğ. (2006), Baritin betonda kullanımı ile ilgili deneysel bir çalışma yapmış ve betonda Barit kullanımının, betonun sertleşmiş özellikleri üzerinde önemli bir katkısı



olmadığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, her üç karışım tasarımında da optimum su/çimento oranı 0.43 olarak belirlenmiştir. Barit ile ilgili Revuelta ve diğ. (2009), Saidani ve diğ. (2015) ile Jankovic ve diğ. (2016) yapmış olduğu çalışmalarda ise Revuelta ve diğ. (2009) Bariti agrega olarak betonda kullandıktan sonra akışkanlık özelliklerine bakmışlardır. Her ne kadar ağır malzeme kaynaklı bir standardı yakalayamama olsa da genel olarak Barit katkılı kendinden yerleşen betonun gerçek şartları sağladığı rapor edilmiştir. Saidani ve diğ. (2015), betonda agrega olarak Barit kullanımını araştırmıştır. Betonda Barit kullanımının, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı gibi birçok parametre üzerinde azaltıcı etkisi olduğunu bildirmişlerdir. Genel olarak betonda Barit kullanımı, 28 günlük basınç dayanımı %10 civarında ve bir yıl sonundaki elastik modülünü % 20 civarında azalttığı belirlenmiştir. Jankovic ve diğ. (2016), agrega olarak kullanılan Barite ile ultra yüksek performanslı beton üretmiştir. Çalışmalarında, barit tozu ile üretilmiş KYH mekanik özellikleri ve dayanımları incelenmiştir. Barit tozu, mineral katkı maddesi olarak ağırlıkça beyaz çimento ile ikame edilmiştir. Cemalgi ve diğ. (2018) çalışmalarında ince agrega yerine ikame edilmiş kauçuk ile üretilmiş KYH özelliklerini incelemiştir. Ayrıca farklı kür sürelerinin KYH özelliklerine etkisini incelemiştir. Kauçukların harcın tokluğunu arttırmakla birlikte KYH özelliklerini ciddi oranda değiştirdiği ifade edilmiştir. Bu çalışmada ise, toplam çimento ağırlığının %5'i, %10'u, %20'si ve %30'u oranında barit tozuyla ikame edilmiş dört farklı karışım oranı ile bir adet kontrol karışımını kapsayan toplam beş KYH serisi hazırlanmıştır. Basınç ve eğilme dayanımlarının belirlenmesi için toplam 45 adet 40x40x160 mm numune üretilmiştir. Test gününe kadar 7, 28 ve 56 gün boyunca numuneler kür havuzunda bekletildikten sonra sertleşmiş testler yapılmıştır. Karışımların KYH standartlarına ve reolojik özelliklere uygunluğunu değerlendirmek için mini V-hunisi, akış süresi ve mini çökme testleri yapılmıştır.

## Deneysel Çalışma

### Malzeme ve Karışım Oranları

Karışımında Portland Çimentosu (CEM-I 42.5R) kullanılmıştır. Karışım tasarımı doğal kırma agrega ve özellikleri gözetilerek yapılmıştır. Kullanılan kırma agreganın nem muhtevası ve emme kapasitesi sırasıyla % 0.38 ve % 2.42'dir. Barit tozu ve doğal kum Şekil-3'te gösterilmiştir.



a)



b)

Şekil 3. Karışımında kullanılan a) Barit tozu, b) Kırma taş

Kullanılan Barit tozu, çimento, kırma taş kumu ve katkı maddelerinin özgül ağırlıkları sırasıyla 4.2 kg/cm<sup>3</sup>, 3.06 kg/cm<sup>3</sup>, 2.67 kg/cm<sup>3</sup> ve 1.04 kg/cm<sup>3</sup>'tür. Barit ile KYH üretmek için beş çeşit karışım tasarımı hazırlanmıştır. Karışım tasarımı Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Barit tozu katkı KYH karışım tablosu

Sıra	Karışım Kodu	Su/bağlayıcı	Çimento Ağırlığı (kg)	Su (kg)	Katkı (kg)	Aggrega (kg)	Barit Tozu (kg)	Barit Tozu İkame Oranı (%)
1	BRT0BC	0.49	500	245	9.5	1527.2	0	0
2	BRT5BC	0.49	475	245	9.25	1550.9	25	5
3	BRT10BC	0.49	450	245	9.25	1572.8	50	10
4	BRT20BC	0.49	400	245	8.5	1618.3	100	20
5	BRT30BC	0.49	350	245	8	1663.2	150	30

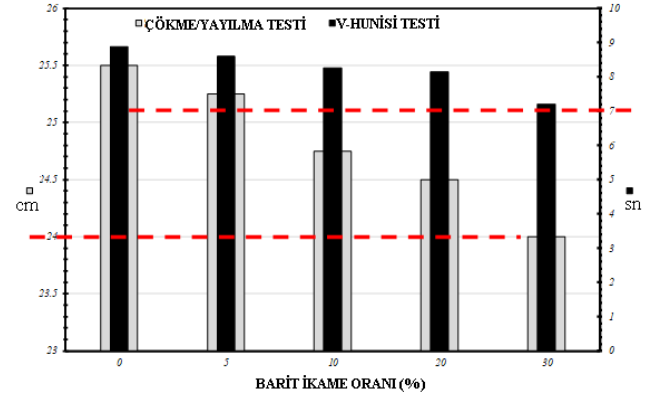
## Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde taze ve sertleştirilmiş KYH özellikleri sunulmuştur. Bu iki test prosedürü ayrı alt bölümlerde açıklanmıştır. Taze harç özelliği testleri Çökme/Yayımla testi ve V-Hunisi testlerinden oluşmaktadır. Ayrıca, yapılan sertleşmiş harç özellikleri testleri, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı testi olarak ayrı bir alt bölüm olarak açıklanmıştır.

### Taze Harç Özellikleri Testleri

Taze harç üzerinde yapılan testler EFNARC (2004) standardı baz alınarak yapılmıştır. Önce, taze harç numuneleri için tasarlanan beş farklı karışım üzerinde çökme akış testi yapıldı. Çökme /Yayımla testi sonuçlarına göre, her bir karışım setinden ölçülen tüm değerlerin EFNARC (2004) ile uyumlu olduğu ve standartta verilen değerler arasında olduğu belirlenmiştir. EFNARC sınırları, Çökme /Yayımla testi için 24 ile 26 cm arasındadır. Ayrıca, asgari ve azami V-hunisi süresi 7 s ve 11 s olarak belirtilmiştir. Taze harç özelliklerine ait deney sonuçları Şekil 4'de

gösterilmiştir.



Şekil 4. Taze harç özellikleri test sonuçları

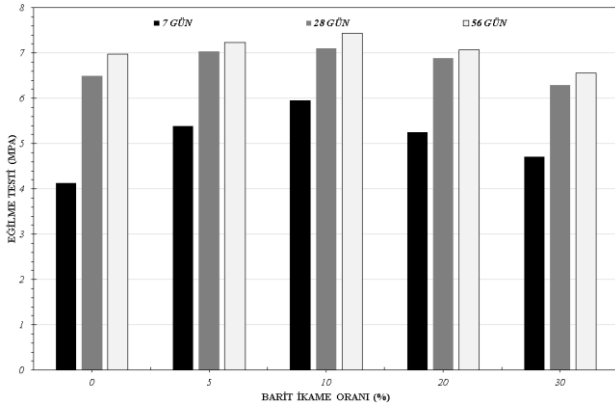
Şekil 4'ten de görüldüğü gibi minimum V-hunisi test sonucu %30 Barit ikameli karışımında elde edilmiştir. Barit oranı arttıkça V-hunisi test sonuçları EFNARC (2004)'ın belirlediği alt sınıra doğru yaklaşmıştır. V-hunisi test sonuçları kontrol karışımından itibaren azami Barit ikame oranına doğru sırasıyla 8.9sn, 8.6sn, 8.25sn, 8.15sn ve 7.2sn olarak ölçülmüştür. Ölçülen tüm değerlerin standartta belirlenen değerler arasında olduğu görülmüştür. Çökme/Yayımla testi sonuçları ise kontrol karışımından azami ikameli Barit oranına doğru 26 cm, 25.5 cm, 25 cm, 24.5 cm ve 23 cm olarak ölçülmüştür. Standartta belirlenen asgari ve azami değerler ise 24 cm ile 26 cm arasında olduğu göz önüne alınırsa, referans değerler arasında olduğu görülmektedir.

### Sertleşmiş Harç Özellikleri

Üç farklı test yaş durumuna göre numuneler üzerinde sertleşmiş harç testleri yapılmıştır. Numuneler hangi yaşta teste tabi tutulmuşlarsa, o yaşa kadar kür havuzlarında küre tabi tutulmuşlardır. Test yaşları 7 gün, 28 gün ve 56 gündür. Testler yapılırken önce 40mmx40mmx160mm ebatlarında numune üzerinde, ASTM C-348 (2008) standardına göre eğilme dayanımı testi yapılmıştır. Daha sonra, eğilme testinden elde edilen kırılmış olan iki parçadan biri üzerinde ASTM C-349 (2008) 'e göre basınç testi uygulanmıştır. Test uygulama prosedürü Şekil 5'te, test sonuçlarına ait grafikler ise Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. Sertleşmiş harç deneyi: Eğilme testi

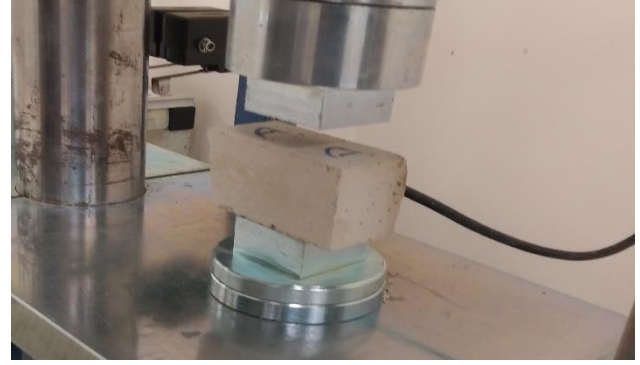


Şekil 6. Eğilme testi sonuçları

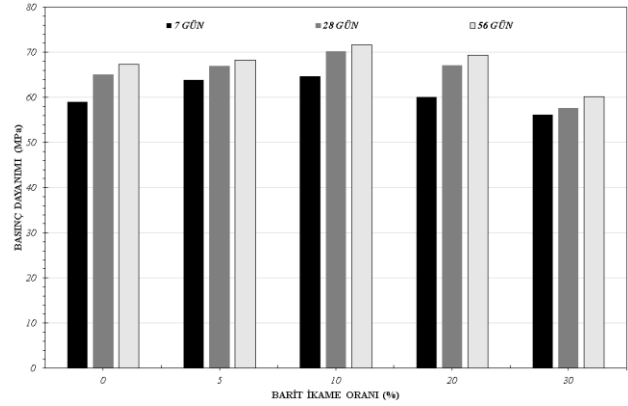
Eğilme test sonuçlarına göre 7 günlük değerler, kontrol harcı 4.13 MPa iken %10 beyaz çimento ikameli Barit karışımına ait eğilme deney sonucu 5.95 MPa'a kadar çıkmış ve daha sonra %30 beyaz çimento ikameli Barit oranında ise 4.71 MPa değerine düşmüştür. 28 günlük eğilme deney sonuçlarına göre ise kontrol karışımı değeri 6.5 MPa değerine ulaşmıştır. %10 ikameli Barit karışımında eğilme deney sonucu 7.11 MPa değerine ulaşmış ve daha sonra %30 ikameli Barit karışımında ise 6.3 MPa değerine düşmüştür. 56 günlük test sonuçlarına göre ise kontrol karışımının eğilme deneyi sonucu 6.97 MPa iken, eğilme deneyi sonucu %10 ikameli Barit karışımında 7.44 MPa değerine çıkmış ve daha sonra %30 Barit ikameli test sonucunda ise 6.56 MPa değerine düşmüştür. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı üzere Barit ikamesi arttıkça erken yaşlarda her ne kadar eğilme deney sonuçları kontrol numunesinin sonuçlarının üzerinde ise de geç yaşlarda yani 28 günlük ve 56 günlük numunelerin deney sonuçlarında ise, kontrol

karışımı numunelerinin altında bir değere düşmüştür.

Eğilme deneyinin numuneleri üzerinde daha sonra basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneyin uygulama anından bir görüntü Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Sertleşmiş harç deneyi: Basınç testi



Şekil 8. Basınç testi sonuçları

Şekil 8'deki basınç testlerinden elde edilen sonuçlara göre 7 günlük kontrol karışımına ait numunelerin test sonucu ortalaması 59 MPa, %10 Barit ikameli basınç test sonucu 64.65 MPa olarak elde edilmiş. Bu değer beş karışım arasında en yükseği olmak üzere azami değerdir. %30 Barit ikameli karışıma ait deney sonucunda elde edilen değer ise daha düşük olarak 56.14 MPa bulunmuştur. 28 günlük test sonuçları kontrol karışımına ait numunelerin ortalaması 65.07 MPa olarak elde edilmiş, %30 Barit ikameli karışımın basınç dayanım ortalaması 70.21 MPa olarak maksimum bir değere ulaştıktan sonra %30 Barit ikameli numunelerin basınç dayanım ortalaması 57.65 MPa değerine düşmüştür. Elde edilen basınç dayanım değerleri değerlendirildiğinde Barit ikamesi arttıkça %10

ikame oranına kadar, değerlerde bir artış gözlenirken, ikame oranının artmaya devam etmesi durumunda değerler düşmüş ve %30 ikame oranına ait basınç değerleri kontrol numunesine ait değerlerin bile altına düştüğü görülmüştür.

## Sonuçlar ve Tartışma

Bu deneysel çalışmada amaç, barit tozu modifiyeli KYH'ların kendinden yerleşen harç özelliklerini ve mekanik özelliklerini araştırmaktır. Barit tozu, mineral katkı maddesi olarak ağırlıkça beyaz çimento ile ikame edilmiştir. Kontrol karışımı ile birlikte, toplam çimento ağırlığının %5'i, % 10'u, % 20'si ve % 30'u oranlarında barit tozundan oluşan beş seri KYH olarak hazırlanmıştır. Test gününe kadar 7, 28 ve 56 gün boyunca kür havuzlarında tutulan numuneler üzerinde kendinden yerleşen, basınç ve eğilme dayanımlarının belirlenmesi için toplam 45 adet 40x40x160 mm numune üretilmiş ve teste tabi tutulmuştur. Üretilen KYH'nin taze hal özellikleri değerlendirildiğinde, Barit ikame oranının artması ile orantılı olarak doğrusal bir azalma oluşmuştur. Bununla birlikte, elde edilen asgari değerlerin bile EFNARC gereksinimini karşıladığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, çimento ile %10 oranında Barit tozu ikamesi, KYH'nin eğilme mukavemetini ve basınç dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Ortalama %10 ikame miktarı, Barit tozu ile üretilmiş KYH'nin sertleştirilmiş hal özelliklerini geliştirmek için en uygun değer olduğu bu çalışma ile belirlenmiştir. Barit tozunun KYH özelliklerini geliştirdiği bu çalışma ile belirlenmiş olup, Barit tozunun bağlayıcı madde olarak KYH'ta, ağırlıkça %10 oranından fazla miktarda kullanımı önerilmemektedir.

## Kaynaklar

- ASTM C-348, (2008) American Standard of Testing Material, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars.
- ASTM C-349, (2008) American Standard of Testing Material, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure).
- Cemalgil, S., Onat, O. (2016). Compressive strength and abrasion resistance of concrete with waste marble and demolition aggregate. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 2(1).
- Cemalgil, S., Etili, S., Onat, O. (2018). Curing effect on mortar properties produced with styrene-butadiene rubber. *Computers and Concrete*, 21(6), 705-715.
- EFNARC, (2004) The European guidelines for self-compacting concrete specification, production and use. The European Federation of specialist construction chemicals and concrete systems.
- Gönen, T., Onat, O., Cemalgil, S., Yılmaz, B., Altuncu, Y. T. (2012). A review on new waste materials for concrete technology. *Electronic Journal of Construction Technologies*, 8(1), 36-43.
- <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/barit>
- Janković, K., Stanković, S., Bojović, D., Stojanović, M., Antić, L. (2016) The influence of nano-silica and barite aggregate on properties of ultra-high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 126, 147-156.
- Kilincarslan, S., Akkurt, I., Basyigit, C. (2006) The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 424(1-2), 83-86.
- Revuelta, D., Barona, A., Navarro, D. (2009). Measurement of properties and of the resistance to segregation in heavyweight, self-compacting barite concrete. *Materiales de construcción*, 59(295), 31-44.
- Saidani, K., Ajam, L., Ouezdou, M. B. (2015) Barite powder as sand substitution in concrete: Effect on some mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 95, 287-295.

## Mechanical Properties of Self-Compacting Mortars Modified with Barite Powder

### Extended abstract

The aim of this experimental study is to investigate the fresh state and hardened state properties of the self-compacting mortars (SCM) produced with barite powder. Barite is barium sulphate ( $BaSO_4$ ), the most common mineral of the element barium. Barite is the heaviest of non-metallic minerals. Barite has a high density ( $4.45 \text{ gr / cm}^3$ ), low abrasiveness (Moh's 3-3.5), chemical stability under high temperature and pressure, low solubility in water and acids, lack of magnetic properties and reasonable costs. 85-90% of the world barite production is used in oil drilling, in the production of drilling mud weight, in the production of residual barium chemicals and in fillers. Barite paint, paper, plastic, rubber, glass, ceramics, and friction materials are used both as cost reducers and as functional fillers in the industry. Barite powder is replaced by weight with white cement as a mineral additive. Ordinary Portland cement (CEM I 42.5R) was used in Barite used mortar. Natural crushed aggregate was used in mix design. Moisture content and absorption capacity of used crushed aggregate are 0.38% and 2.42%, respectively. Specific gravities of used Barite dust, cement, crushed sand and additives are  $4.2 \text{ kg/cm}^3$ ,  $3.06 \text{ kg/cm}^3$ ,  $2.67 \text{ kg/cm}^3$  and  $1.04 \text{ kg/cm}^3$ . In this study, five series of SCM including control mixture was produced. Replacement level of Barite powder were determined 5%, 10%, 20% and 30% by total cement weight. A total of 45 specimens in dimensions of  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$  were produced to determine the compressive and flexural strengths cured for 7, 28 and 56 days until the testing day. Mini V-funnel flow and mini-slump flow diameter tests were conducted to assess the conformity of the mixtures to the standards and rheological properties on the base of EFNARC. Minimum flexural strength test result was measured 4.13 MPa from control mix (BRT0WPC). In addition, maximum flexural strength test was 5.95 MPa measured from BRT10WPC at 7 days age. Minimum and maximum flexural strength values measured at 28 days age were 6.3 MPa BRT30WPC and 7.11 MPa BRT10WPC. 6.56 MPa and 7.44 MPa test results were obtained from BRT30WPC and BRT10WPC, respectively at 56 days age. Compressive strength test results were measured between 56.14 MPa and 64.66 MPa at 7 days age. Minimum and maximum values measured from set id BRT30WPC and set id

BRT10WPC. Minimum compressive strength test result was measured 57.65 MPa from set id BRT30WPC and maximum compressive strength test result was measured 70.21 MPa from set id BRT10WPC at 28 days age. Minimum and maximum compressive strength test results were obtained 60.2 MPa from set id BRT30WPC and 71.72 MPa from set id BRT10WPC. The maximum strength results were obtained from 10% barite dust replacement level compared to control samples. It is observed that fresh properties of SCM started to decrease with increasing of Barite replacement level. However, obtained minimum level of fresh state properties were above minimum requirement of EFNARC standard. All replacement level of Barite has not affected negatively the self-compacting properties. Maximum flexural strength test result was obtained from 10% replacement level of Barite at all ages. Replacing 30% Barite has not decreased flexural strength test result lower than control mix at 7 days age. However, replacing 30% Barite with binder decreased flexural strength lower than control mix at 28 days and 56 days age. Maximum compressive strength test result was obtained at 10% replacement level of Barite with binder. Increasing replacement level Barite with white cement resulted in lower compressive strength result than control mix. Consequently, 10% replacement level of Barite was developed hardened state properties of SCM.

**Keywords:** Self-compacting mortar, Barite powder, Fresh state properties, Hardened state properties



# Yapı-Zemin Etkileşiminin Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Davranışına Etkisi

**Emin HÖKELEKLİ**

Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Bartın

[ehokekli@bartin.edu.tr](mailto:ehokekli@bartin.edu.tr)

ORCID: 0000-0003-0548-5214, Tel: (378) 294 91 79

Geliş: 30.09.2019, Revizyon: 04.01.2020, Kabul Tarihi: 10.03.2020

## Öz

Yapı zemin etkileşimi yapıların deprem etkileri altındaki davranışlarının doğru olarak belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Geleneksel tasarım çalışmalarında yapının tabandan ankastre olduğu kabulü sıklıkla kullanılmakta ve yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmamaktadır. Bununla birlikte, özellikle esnek zemin ortamlarında bulunan tarihi yığma yapılarda deprem yer hareketleri yapı davranışını önemli derecede etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, tarihi yığma bir minarenin esnek ve ankastre mesnetlenme durumları için deprem davranışları, yatay ve yatay+düşey yer hareket bileşenleri için araştırılmaktadır. Çalışmada, kayma dalgası hızları sırasıyla 1000, 270 ve 90 m/s olan üç farklı zemin türü kullanılmıştır. Üç boyutlu sonlu eleman modelinin oluşturulmasında minarede tetrahedral, zemin ortamında hexahedral sonlu ve sonsuz elemanlar kullanılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modeli, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi deneysel sonuçlarına göre kalibre edilmiştir. Kalibre edilen sonlu eleman modeli kullanılarak minare-zemin etkileşim sisteminin yatay, yatay+düşey yer hareketleri altında lineer deprem davranışları, farklı zemin ve ankastre mesnetlenme durumları için elde edilerek karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yapı-zemin etkileşimi; Tarihi yığma minare; Sonlu elemanlar analizi; Yatay yer hareketi; Deprem davranış

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI: 10.24012/dumf.626894

## Giriş

Cami, kilise, han, hamam, köprü gibi tarihi yapılar içerisinde yığma minare ve kuleler, ince ve uzun geometrileri nedeniyle deprem ve rüzgâr gibi doğal afetlere karşı daha savunmasızdırlar. Büyük depremlere maruz kalan bu yapıların bir kısmı tamamen yıkılmış, bir kısmı ise ciddi hasar görmüştür. Örnek olarak 2011 Van depreminde 76 minare hasar görmüş ve bu minarelerden 50 tanesi yıkılmıştır [1]. Minare, kule türü yığma yapıların statik ve dinamik davranışlarının belirlenmesi konusunda hem deneysel hem de teorik yöntemler kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Yığma minare ve kule türü yapılar ile ilgili son yıllarda yapılmış çalışmalar aşağıda sunulmaktadır. Rainieri ve Fabbrocino [2], Shakya vd. [3], Bartoli vd. [4] yığma türü kule, minare ve bacalar için temel frekanslarının belirlenmesine yönelik ampirik formüller önermişlerdir. Gentile ve Saisi vd. [5], Bayraktar vd. [6], Foti vd. [7], Nohutçu vd. [8], Hacıfendioglu ve Maraş [9], Diaferio vd. [10] Livaoğlu vd. [11] kule ve minare türü yapıların frekans, mod şekli ve sönüm oranlarını Operasyonel modal analiz yöntemini kullanarak belirlemişlerdir. Sevim vd. [12] çevresel titreşim deneylerini kullanarak minarelerin deprem davranışlarını incelemişlerdir. Oliveira vd. [13] farklı boyutlarda 11 adet minarenin deneysel, teorik frekanslarını karşılaştırmış, minarelerden 7'sinin deprem risk seviyelerini belirlemişlerdir. Mortezaei vd. [14] yığma bir cami ve minaresinin deprem davranışını lineer ve lineer olmayan analiz yöntemlerini kullanarak araştırmıştır. D'Ambrisi vd. [15] yığma bir kulenin çevresel titreşim deneyleri ile dinamik karakteristiklerini belirlemiş ve yapının sonlu elemanlar modelini deneysel sonuçlara göre kalibre etmiştir. Kalibre edilmiş sonlu eleman modeli kullanılarak kulenin sismik performansı değerlendirmiştir. Milani vd. [16], Preciado [17], Valenta vd. [18, 19], Bartoli vd. [4] yığma kulelerin doğrusal olmayan deprem davranışını statik ve dinamik yöntemler kullanarak incelemişlerdir. Minghini vd. [20] Emilia

depreminde hasar gören tarihi bir bacadın sismik davranışını araştırmışlardır. Pintucchi vd. [21] yığma kulelerin deprem davranışını statik ve zaman tanım alanında yöntemleri ile incelemişlerdir. Nohutçu vd. [22] tarihi bir minarenin lineer ve lineer olmayan deprem davranışlarını zaman tanım alanında kalibre edilmiş sonlu eleman modeli kullanarak araştırmıştır. Hejazi vd. [23] tarihi bir minarenin yapısal davranışını sıcaklık, rüzgâr ve deprem yükleri altında incelemiştir. Kocatürk ve Erdoğan [24] kuvvetli deprem hareketlerinin minarelerin enerji yutma kapasitesine düşey metal birleşim elemanlarının etkisini araştırmışlardır. Erdoğan vd. [25] 1999 yılında meydana gelen Düzce depremine maruz kalan altı farklı minarenin deprem davranışını araştırmışlardır. Ubertini vd. [26] kule türü yapıların doğal frekansındaki değişime nem ve sıcaklığın etkisini çevresel titreşim deneylerini kullanarak araştırmışlardır. Hacıfendioglu vd. [27] tarihi minarenin dinamik karakteristiklerini sonlu eleman metodu ve deneysel yöntemlerle belirlemişler ve model kalibrasyonunun yapısal davranışı etkilediğini ifade etmiştir. Diaferio vd. [28] tarihi çan kulesinin davranışlarını İtalyan Yönetmeliğini kullanarak dinamik, lineer/lineer olmayan statik yöntemler ile araştırmışlardır. Bayraktar vd. [29] restorasyonun yığma minarelerin dinamik davranışı üzerine etkisini Operasyonel modal analiz yöntemini kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Erdil vd. [30] yapısal parametrelerin minarelerin sismik davranışına etkilerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak araştırmışlardır.

Yukarıda sunulan çalışmaların büyük bir kısmında yapı-zemin etkileşimini göz ardı edilmiştir. Bu çalışmalarda yapının sert zemine oturduğu düşünülerek zemine ankastre olarak mesnetlenmiştir. Eğer yapının oturduğu zemin elastik özelliklere sahip derin sert bir kaya ise bu yaklaşım doğru kabul edilebilir. Aksi durumda ikinci doğal frekans ile düşey ivme bileşeni arasındaki ilişki nedeniyle yapıda meydana gelecek hasarlar doğru tahmin edilmeyebilir [31].

Literatürde yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak minare ve kule türü yığma yapıların sismik davranışının belirlenmesi konusunda çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar; Casolo vd. [32] tarihi yığma bir çan kulesinin farklı zemin koşulları altında sismik davranışını lineer/nonlineer analiz yöntemlerini kullanarak incelemiştir. Casolo ve Uva [33], Pitalakis ve Karatzetzou [34], Ceroni vd. [35] yığma yapıların oturduğu zemin ortamını yaylar ile modellemiştir.

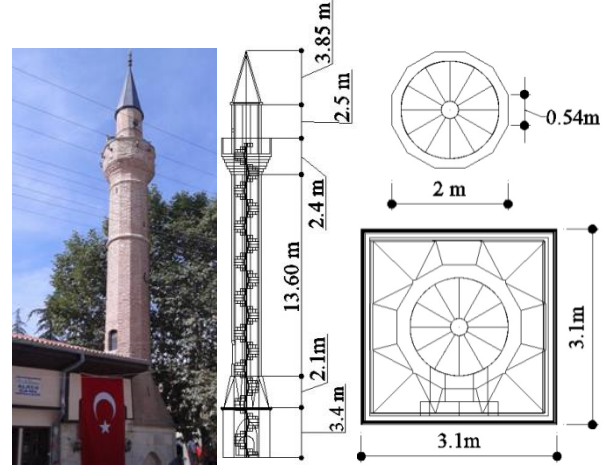
Bu çalışma kapsamında, öncelikle minarenin çevresel titreşim deneyleri ile deneysel dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Daha sonra Abaqus V10 [36] programı kullanılarak teorik dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Teorik dinamik karakteristikler deneysel sonuçlara yaklaştırılarak yapının sonlu eleman modeli kalibre edilmiştir. Minarenin kalibre edilmiş sonlu eleman modeli kullanılarak lineer deprem analizleri yapılmıştır. Yapının ankastre ve üç farklı zemine (sert, orta, yumuşak) mesnetlenmesi durumları göz önüne alınarak her bir model için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Analizlerde ilk olarak zemin yapı etkileşimli ve etkileşimsiz durumlar için modal analiz yapılmış ve dinamik karakteristikler (mod şekilleri, doğal frekansları) belirlenmiştir. Son olarak zaman tanım alanında lineer deprem analizleri yapılarak yapıda meydana gelen maksimum yer değiştirmeleri, maksimum (çekme) ve minimum (basınç) gerilmeleri belirlenmiştir. Analiz sonuçları karşılaştırılarak yapı-zemin etkileşiminin yığma bir minarenin sismik davranışına etkisi araştırılmıştır.

## Materyal ve Yöntem

### Tarihi Alaca Camii Minaresi

Bu çalışmada uygulama alanı Afyon ili Bolvadin ilçesinde yer alan 1271 yılında inşaa edilen tarihi Alaca Camii minaresi seçilmiştir. Minare tek şerefeli ve camiinin Kuzey-Doğu köşesinde bulunmaktadır. Farklı geometrik özelliklere sahip minarenin kürsü kısmı kare, geçiş bölgesi prizmatik, gövde kısmı ise çokgen kesitlidir. Minarenin toplam yüksekliği 27m'dir.

Minareyi oluşturan geçiş bölgesi, gövde, balkon, alem kısımlarının yüksekliği ve duvar kalınlıkları Şekil 1'de sunulmuştur. Minarenin taşıyıcı sisteminde tuğla, andezit taşı ve horasan harcı kullanılmıştır.



Şekil 1. Tarihi Alaca Camii minaresi ve boyutları

### Yapı-Zemin Etkileşimi

Yapı-zemin etkileşimde en önemli problem sonlu boyuta sahip olan yapı ve sonsuz boyuta sahip olan zeminin modellenmesidir. Sonlu elemanlar yöntemi zemin yapı etkileşim analizlerinde ve modellemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapı-zemin etkileşiminde sonlu eleman modelin gerçeği yansıtabilmesi için sonsuz boyuta sahip zeminin doğru olarak modellenmesi gerekmektedir. Sonsuz boyuta sahip olan bir zeminin sonlu bir bölge olarak modellenmesi durumunda, zemin içerisinde yayılan sismik dalgaların sonlu bölgenin sınırlarına çarparak geri dönmeye ve sürekli olarak zemin içerisinde hareket etmelerine sebep olmaktadır. Bu davranış dalga yayılım hareketini doğru idealize etmediği için, yapı-zemin etkileşiminde gerçekçi olmayan sonuçların elde edilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle zemin içinde hareket eden dalgaların sonlu elemanlar zemin bölgesinin sınırından geçmesini sağlayacak matematiksel modelin kurulması gerekmektedir.

Yapı-zemin etkileşiminde dalganın sonlu eleman sınırından geçmesini sağlayan farklı modelleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birincisi sonlu zemin bölgesinin

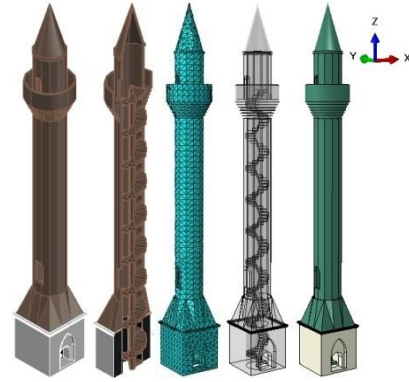


sınırları modellenirken sıklıkla geçirgen yapay sınırlar kullanılmaktadır. İkinci modelleme yönteminde ise dalga yayılımının etkili olduğu, yakın zemin bölgesi için sonlu elemanlar yöntemi, uzak zemin bölgesi içinse sonsuz elemanlar yönteminin kullanılmasıdır. Uzak bölge olarak ifade edilen yerin başlangıç sınırı, sonlu eleman ağının bittiği sınırlardır. Uzak zemin bölgesi için tanımlanan sonsuz elemanlar, ortamda yayılan ve sonsuza giden dalgaları idealize edecek şekilde seçilmektedir. Bu tür modellemede sonsuz elemanlar için rijitlik ve kütle matrisleri şekil fonksiyonları kullanılarak oluşturulmakta ve sonlu elemanlarla birlikte uygulanabilmektedir. Uzak zemin bölgesinin modellenmesinde sonsuz eleman kullanılması karmaşık geometriye sahip üç boyutlu yapıların zemin etkileşim problem analizleri için geçen süreyi kısaltmaktadır.

Bu çalışmada; minare ve zeminin sonlu eleman modelleri ayrı ayrı oluşturulmuş ve daha sonra bir araya getirilerek tek bir sonlu eleman modeli elde edilmiştir. Zemin ortamının yakın zemin bölgesi lineer sonlu elemanlar (C3D8), uzak zemin bölgesi ise sonsuz (infinite) elemanlar (CIN3D8) kullanılarak modellenmiştir.

### Minare Sonlu Elemanlar Modeli

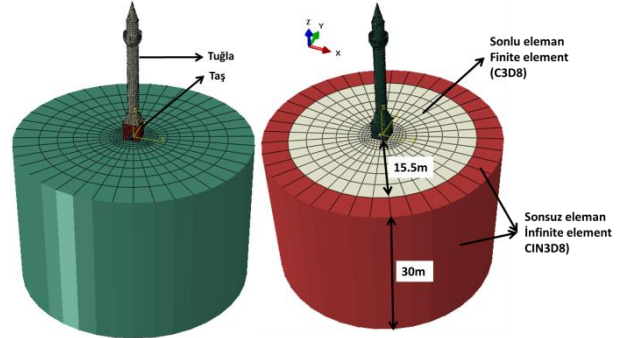
Minarenin yerinde ölçümler yapılarak Abaqus programında 3D katı modeli ve sonlu elemanlar modelinin oluşturulmuştur (Şekil 2a-2b). Sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında 61107 adet dört düğüm noktasına sahip lineer tetrahedral eleman (C3D4) ve 19809 düğüm noktası kullanılmıştır. Zemin ortamının, sonlu zemin bölgesinin modellenmesinde 4852 adet lineer hexahedral eleman (C3D8), sonsuz zemin bölgesinde ise 450 adet hexahedral sonsuz (infinite) eleman (CIN3D8) kullanılmıştır (Şekil 2).



a) Katı model b) Sonlu Eleman Modeli  
Şekil 2. Minarenin üç boyutlu katı ve sonlu eleman modeli

### Zeminin Sonlu ve Sonsuz Eleman Modeli

Sonlu ve sonsuz zemin ortamı arasındaki yatay mesafe yapı genişliğinin yaklaşık beş katı, ana kayaya kadar olan zemin derinliği ise 30m alınmıştır [37]. Minare-temel yüzeyi arasındaki etkileşimin modellenmesinde bağ (tie) kontak kullanılmıştır. Temel-zemin yüzeyleri arasında ayrılmanın olmadığı hard etkileşim ile kayma yönünde ise sürtünmeli etkileşim tanımlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Minare-zemin sonlu ve sonsuz eleman modeli

### Malzeme mekanik özellikleri

Minarenin taşıyıcı sistemini oluşturan gövde duvarlarında tuğla, gövde altında yer alan geçiş bölgesi ve kürsü kısmında taş malzeme, bağlayıcı olarak ise horasan harcı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Nohutçu vd. [8] tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır (Tablo 1).

Sonlu eleman modellemesinde makro malzeme modelleme tekniği kullanılmıştır. Yığma birimi oluşturan taş, tuğla ve harç birimi için ortak malzeme özellikleri belirlenmiştir. Yığma duvar basınç dayanımı Denklem (1) kullanılarak elde

edilmiştir [38].

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (1)$$

Yığma sistemin morfolojik yapısına göre K,  $\alpha$  ve  $\beta$  sabit değerler almaktadır. Burada K,  $\alpha$  ve  $\beta$  için sırası ile 0.5, 0.65 ve 0.25 değerleri alınmıştır.  $f_b$  (MPa), taş veya tuğlanın basınç dayanımı,  $f_m$  (MPa) harcın basınç dayanımını ifade etmektedir. Yığma duvar elastisite modülü Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır [39].

$$E = \frac{t_m + t_u}{\frac{t_m}{E_m} + \frac{t_u}{E_u}} \rho \quad (2)$$

Denklem (2)'de verilen  $\rho$  harç ve yığma birimler arasındaki kenetlenmeye göre

değişmektedir.  $t_m$ , harcın ortalama kalınlığını,  $t_u$ , taş veya tuğlanın ortalama yüksekliğini,  $E_m$ , harç elastisite modülünü,  $E_u$ , taş veya tuğlanın elastisite modülünü ifade eder. Yığma taş duvar ve yığma tuğla duvar için başlangıç elastisite modülü Denklem (2) kullanılarak sırası ile 4404 MPa ve 1362MPa, basınç dayanımları ise Denklem (1) kullanılarak sırası ile 5.7MPa ve 3.4MPa olarak hesaplanmıştır. Yığma taş ve tuğla duvar çekme dayanımları basınç dayanımlarının %10'u alınarak hesaplanmıştır.

Yapı-zemin etkileşimi için sert, orta ve yumuşak olmak üzere üç farklı zemin tipi seçilmiştir. Zeminlere ait lineer malzeme özellikleri ve Rayleigh sönüm katsayıları Kramer [40] tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır (Tablo 2).

Tablo 1. Minarede kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri [8].

Malzeme	Basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson oranı
Tuğla	8.2	2985	2100	0.25
Andezit Taşı	30	12240	2200	0.3
Harç	6.25	1100	1340	-

Tablo 2. Zemin malzeme özellikleri [40].

Zemin özellikleri	Birim hacim ağırlık	Elastisite modülü	Poisson oranı	Kayma modülü	P dalgası hızı	Kayma dalgası hızı	Rayleigh sönüm katsayıları	
	(kg/m <sup>3</sup> )	(N/m <sup>2</sup> )	$\nu$	(N/m <sup>2</sup> )	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\alpha_r$	$\beta_r$
<b>Sert</b>	2064	5.68E+09	0.3	2.10E+09	2082	1000	3.920	0.00047
<b>Orta</b>	1864	3.61E+08	0.35	1.38E+08	505.5	270	1.059	0.00176
<b>Yumuşak</b>	1667	3.45E+07	0.4	1.38E+07	156	90	0.353	0.00530

### Modal Analiz ve Model Kalibrasyonu

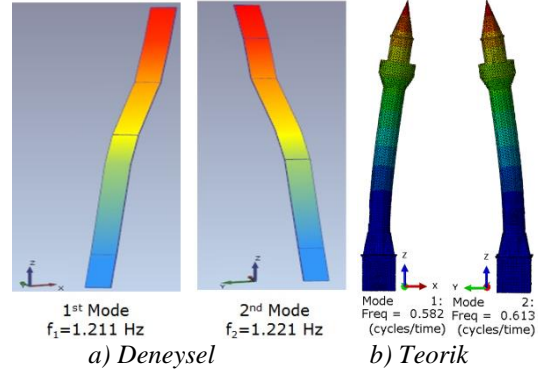
Alaca Camii minaresinin deneysel olarak dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılmıştır. Çevresel titreşim etkilerinin yapıda oluşturduğu titreşimlerin ölçülmesinde hassas ivmeölçerler kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. İvmeölçer yerleşim yerleri

İvmeölçerlerden alınan sinyaller veri toplama cihazında toplanmıştır. Toplanan veriler ARTEMIS Modal Pro [41] yazılımına aktarılarak minarenin deneysel dinamik karakteristikleri elde edilmiştir (Şekil 6a). Yığma birimlerin başlangıç malzeme parametreleri kullanılarak minare tabanının ankastre kabulü ile elde edilen teorik frekans değerleri ve mod şekilleri Şekil 6b'de sunulmuştur. Deneysel ve teorik frekanslar arasında farklar olduğu ve farkın analizde kullanılan malzeme parametrelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Teorik frekanslar deneysel sonuçlara yaklaştırılarak minarenin sonlu eleman modeli kalibre edilmiştir. Minarenin sonlu eleman model kalibrasyonunda malzeme parametrelerinden faydalanılmıştır.

Kalibrasyon öncesi yığma tuğla duvarın elastisite modülü 1362MPa, kalibrasyondan sonrası 4400MPa, yığma taş duvar elastisite modülü 4404MPa, kalibrasyondan sonra ise 9500MPa olarak belirlenmiştir.



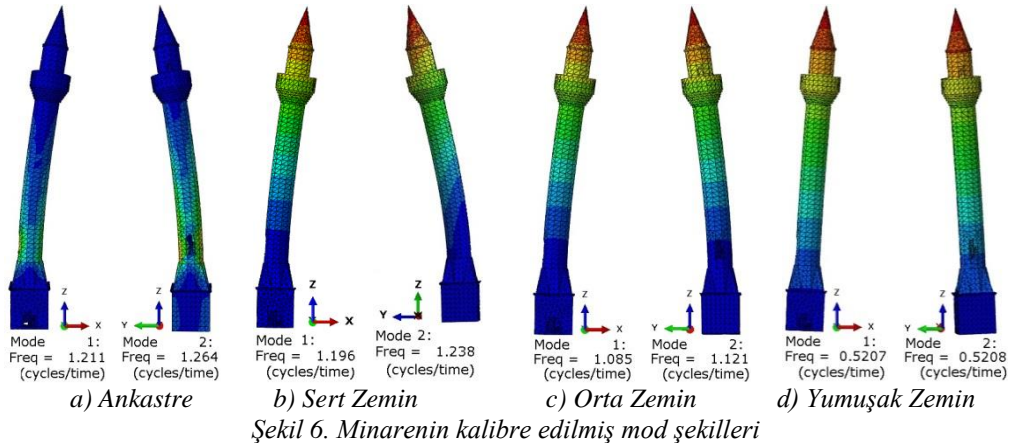
Şekil 5. Alaca Camii minaresi deneysel ve teorik mod şekilleri

Minarenin kalibre edilmiş sonlu eleman modelinin ankastre ve üç farklı zemin ortamına mesnetlendiği düşünülerek modal analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen ilk beş teorik frekans değerleri Tablo 3'te, mod şekilleri ise Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6'dan teorik mod şekillerinin birbirlerine benzer olduğu, frekans değerlerinin ise ankastre ve sert zemin durumunda deneysel ölçümlere yakın olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara göre minarenin üzerinde bulunduğu ortamın sert zemin özelliklerine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Zemin yapı etkileşimli ve zeminsiz durumları dikkate alınarak zaman tanım alanında lineer deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanında deprem analizlerde kalibre edilmiş sonlu eleman modeli kullanılmıştır.

Tablo 3. Minarenin kalibre edilmiş SE model teorik ve deneysel frekansları

Mod	Teorik Frekanslar (Hz)								Deneysel frekanslar OMA (Hz)
	Sonlu eleman modeli kalibrasyon öncesi frekanslar				Sonlu eleman modeli kalibrasyon sonrası frekanslar				
	Ankastre	Sert	Orta	Yumuşak	Ankastre	Sert	Orta	Yumuşak	
1	0.582	0.624	0.617	0.516	1.211	1.196	1.085	0.520	1.211
2	0.613	0.651	0.643	0.517	1.264	1.238	1.121	0.520	1.271
3	3.897	3.932	1.597	0.575	7.942	5.967	1.599	0.708	7.856
4	3.941	3.968	1.597	0.593	8.016	6.972	1.600	0.896	8.021
5	4.962	5.549	2.207	0.708	10.614	7.338	2.207	0.912	9.980

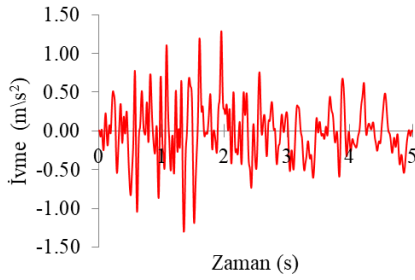


Şekil 6. Minarenin kalibre edilmiş mod şekilleri

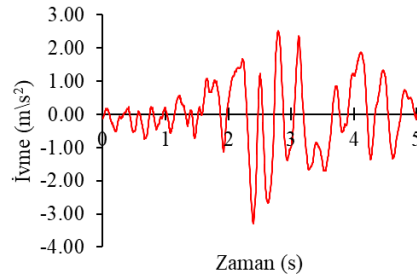
### Yapı-Zemin Etkileşimi Deprem Analizleri

Minarenin lineer deprem analizlerde 10 Ekim 1995, Afyon, Dinar depremi ( $M_w=6.1$ ) ivme kayıtları kullanılmıştır. İvme kayıtlarının doğu-batı (E-W), düşey (V) bileşenlerinin etkili olduğu beş saniyelik kısmı analizlerde kullanılmıştır (Şekil 7).

Deprem bileşenlerinin yatay ve düşey maksimum ivme değerleri sırası ile  $3.23 \text{ m/s}^2$  ve  $1.28 \text{ m/s}^2$ 'dir. Analizlerde doğu-batı (E-W) bileşeni yatay (x) doğrultuda, düşey bileşen (z) doğrultusunda minareye etkilmiştir.



a) Doğu-batı (E-W) ivme bileşeni

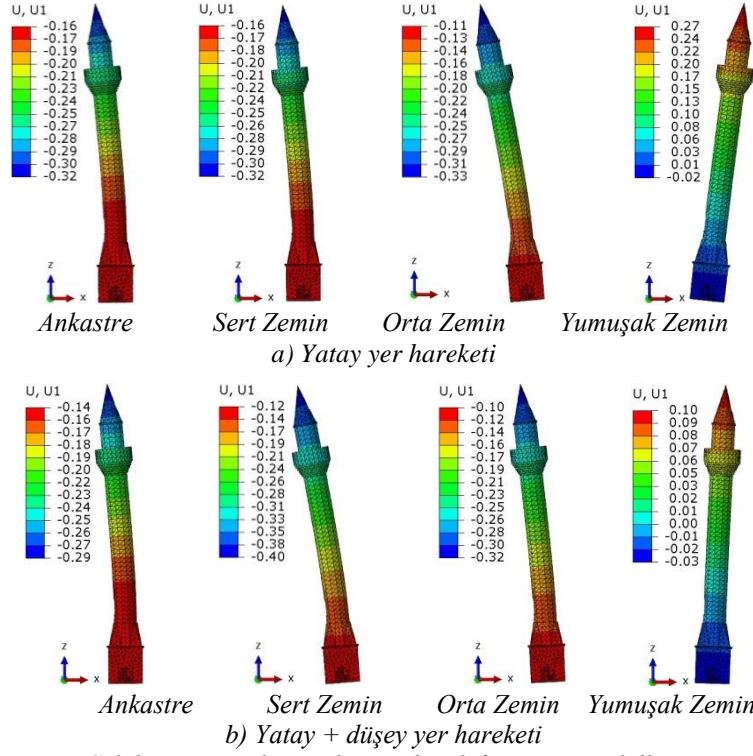


b) Düşey (V) ivme bileşeni

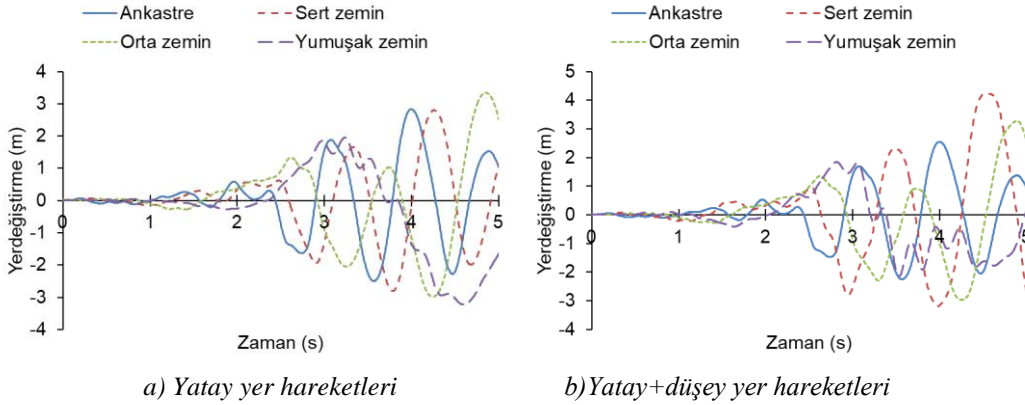
Şekil 7. 10 Ekim 1995, Afyon, Dinar depremi ( $M_w=6.1$ ) yatay ve düşey ivme bileşenleri

Farklı zemin özelliklerinin minarenin sismik davranışı üzerine etkilerini görmek amacı ile lineer deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde yatay ve yatay+düşey yer hareketi yükleme durumları ayrı ayrı kullanılmıştır. Tüm analizlerde minarenin kendi ağırlığı dahil edilmiştir. Yatay (x) doğrultuda etkililen deprem ivme bileşeni kullanılarak yapılan lineer deprem analizi sonucu, minarede meydana gelen maksimum yer değiştirmenin yumuşak zemine durumunda meydana geldiği görülmüştür. Minare tepe noktasında

meydana gelen maksimum yer değiştirmenin yatay (x) yönde  $0.29\text{m}$  düşey z doğrultusunda ise  $0.033\text{m}$  olduğu görülmüştür (Şekil 8a). Yatay ve düşey ivme bileşenlerinin aynı anda uygulanması durumunda minare tepe noktasında meydana gelen maksimum yer değiştirme  $0,28\text{m}$  yatay (x) ve  $0,045\text{m}$  düşey (z) doğrultuda ve sert zemin durumunda meydana geldiği görülmüştür (Şekil 8b). Maksimum yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimleri Şekil 9'da verilmektedir.



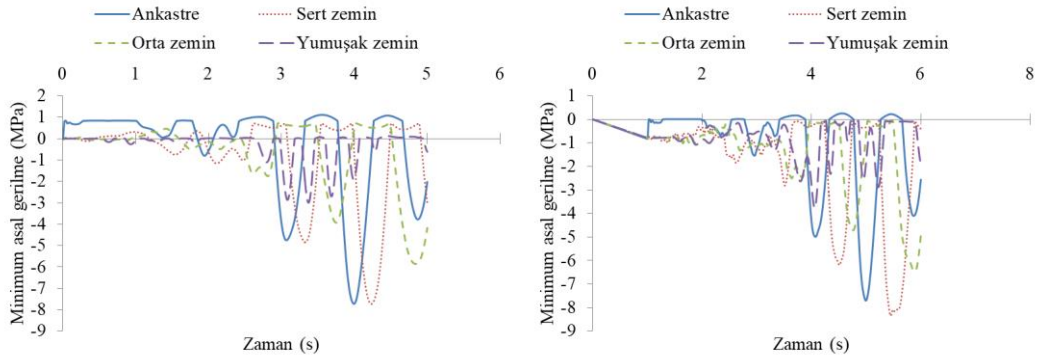
Şekil 8. Minarede meydana gelen deformasyon şekilleri



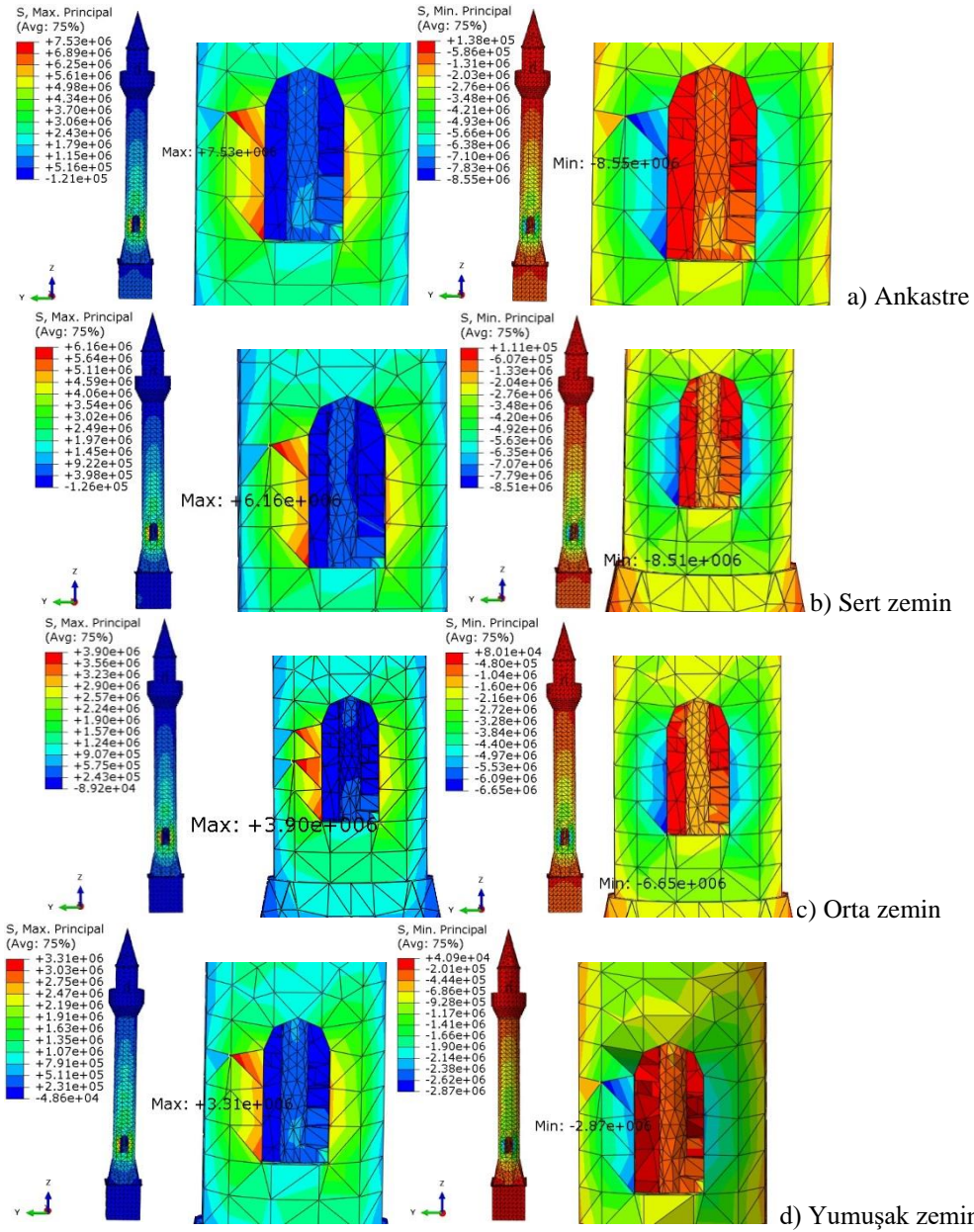
Şekil 9. Minare tepe noktasında meydana gelen maksimum yerdeğiştirme zaman grafiği

Şekil 9a'dan yapıya yatay deprem kuvvetlerinin etkimesi durumunda sert zeminden yumuşak zemine doğru minare tepe noktasındaki maksimum yerdeğiştirmenin arttığı ve yumuşak zemin durumunda maksimum değeri aldığı görülmüştür. Şekil 9b'den yatay ve düşey deprem bileşeninin birlikte etkimesi durumunda sert zeminden yumuşak zemine doğru minare tepe noktasında meydana gelen maksimum yerdeğiştirmenin azaldığı ve yumuşak zemin durumunda en küçük değeri aldığı

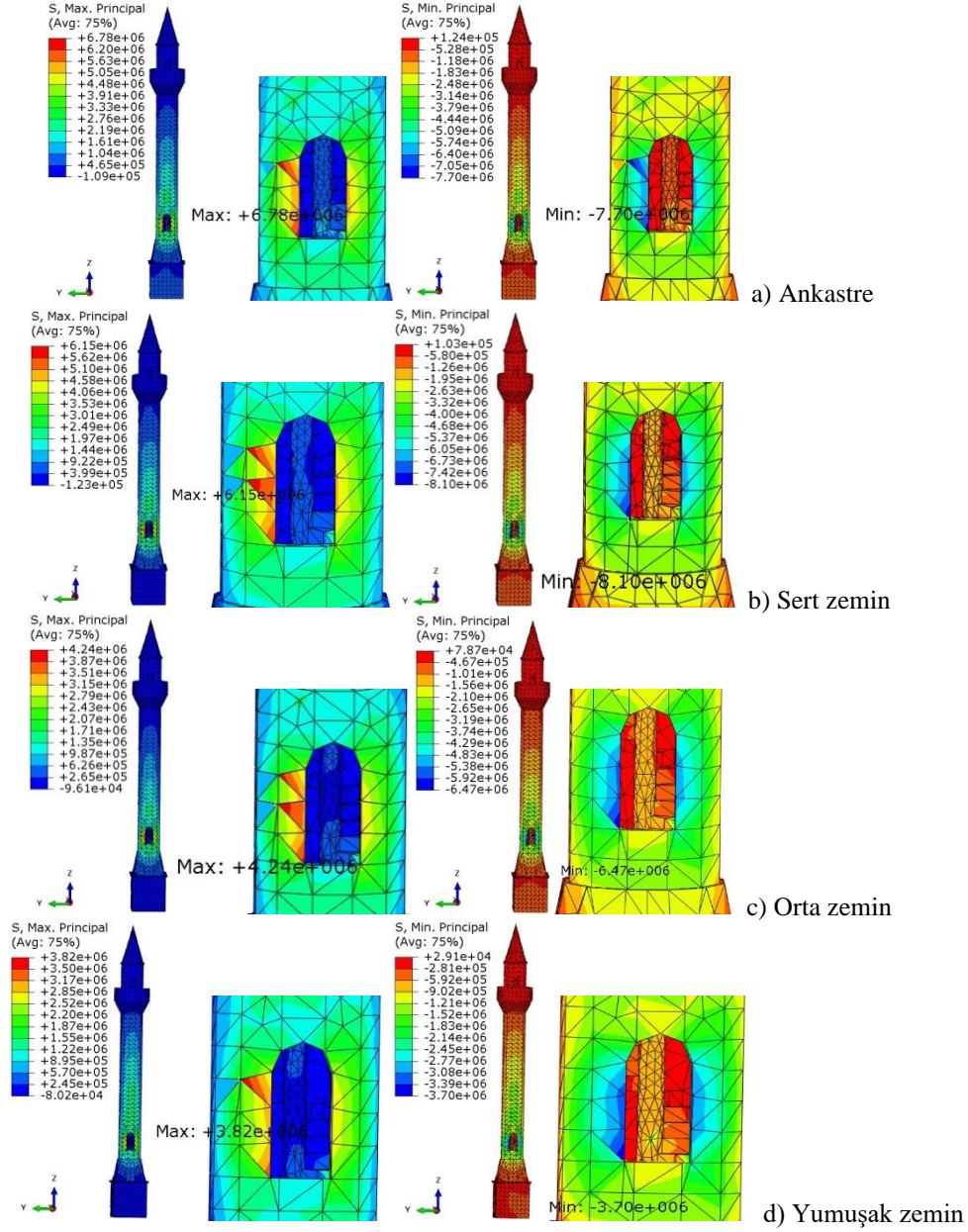
görülmüştür. Yapı-zemin etkileşimi göz önüne alındığında, düşey yer hareketinin yerdeğiştirme davranışını önemli derecede etkilediği görülmüştür. Yatay ve yatay+düşey yer hareketleri altında maksimum (çekme) gerilmelerinin zamana bağlı değişimi Şekil 10'da verilmiştir. Maksimum (çekme) ve minimum (basınç) gerilmelerinin minare üzerinde yoğunlaştığı bölgeler Şekil 11-12'de sunulmuştur.



a) Yatay yer hareketi için b) Yatay+düşey yer hareketleri için  
Şekil 10. Minarede meydana gelen maksimum (çekme) gerilmelerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 11. Yatay yer hareketi altında maksimum (çekme) ve minimum (basınç) gerilmelerinin farklı zaman adımlarında minare üzerinde dağılımları.



Şekil 12. Yatay+düşey yer hareketi altında maksimum (çekme) ve minimum (basınç) gerilmelerinin farklı zaman adımlarında minare üzerinde dağılımları.

Yatay yer hareketi için maksimum (çekme) ve minimum (basınç) asal gerilmeleri minarenin alt kısmındaki kapı çevresinde ve sırasıyla ankastr mesnetlenme durumunda 7.53MPa ve 8.56MPa civarında meydana gelmektedir. Yapı-zemin etkileşimi durumunda gerilme değerlerinin sert zeminden yumuşak zemine doğru azaldığı görülmektedir. Yatay+düşey yer hareketi için ise maksimum (çekme) ve minimum (basınç) gerilmeleri minarenin alt kısımlarında sırasıyla ankastr mesnetlenme durumunda 6.78MPa ve 7.7MPa civarında

meydana gelmektedir. Sadece yatay yer hareketi ile yatay+düşey yer hareketinin birlikte etkimesi durumları gerilme sonuçları karşılaştırıldığında, yatay+düşey yer hareketi durumunda gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür.

## Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, tarihi yığma minarelerin yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak yatay ve yatay+düşey yer hareketleri için sert, orta

ve yumuşak zemin türleri için zaman tanım alanında lineer deprem analizleri yapılmıştır. Lineer deprem analizlerden elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir;

- Sadece yatay yer hareketinin etkilenmesi durumunda maksimum yerdeğiştirme yumuşak zemin durumunda oluşurken, düşey yer hareketinin dikkate alınması durumunda maksimum yerdeğiştirme sert zeminde meydana gelmektedir.
- Düşey yer hareketinin minarenin yer değiştirme dağılımını önemli derecede etkilediği görülmüştür.
- Maksimum (çekme) ve minimum (basınç) gerilmelerinin dağılımı yatay, yatay+düşey yer hareketi etkisinde aynı bölgelerde oluşmaktadır.
- Sadece yatay yer hareketi durumunda sert ve yumuşak zemin durumunda oluşan maksimum (çekme) gerilmeleri arasındaki fark 4.23MPa,
- Düşey yer hareketinin dikkate alınması durumunda bu fark 2.96MPa olmaktadır.
- Sadece yatay yer hareketi durumunda sert ve yumuşak zemin durumlarında oluşan minimum (basınç) gerilmeleri arasındaki fark 5.69MPa, yatay ve düşey yer hareketi durumunda ise bu fark 4MPa olmaktadır.
- Yatay yer hareketi etkisinde minarede meydana gelen maksimum (çekme) gerilemelerinin yığma tuğla duvar limit çekme gerilmesi 0,34MPa değerini 22 kat, yumuşak zemin durumunda ise 9.7 kat daha büyük çıktığı görülmüştür.
- Düşey yer hareketinin göz önüne alınması durumunda meydana gelen maksimum (çekme) gerilemelerinin yığma tuğla duvar limit çekme gerilmesi değerini 19 kat, yumuşak zemin durumunda ise 9.4 kat daha büyük çıktığı görülmüştür.

Yığma minarelerin deprem davranışlarının belirlenmesinde yapı-zemin etkileşimi ve

düşey yer hareketinin göz önüne alınması önem arz etmektedir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçların yüksek çıkması malzeme davranışının lineer kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçların genelleştirilmesi için birçok tarihi yığma yapının yapı-zemin etkileşim sisteminin farklı deprem kayıtları ve farklı zemin özellikleri göz önüne alınarak doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılması gerekmektedir. Bu tür yapıların yapı zemin etkileşiminde daha doğru sonuçların elde edilebilmesi için doğrusal olmayan analizlerinde yapılması önerilmektedir.



## Kaynaklar

- [1] Bayraktar, A., Altunişik, A. C., Muvafik, M. "Damages of minarets during Erciş and Edremit earthquakes, 2011 in Turkey". *Smart Structures and Systems*, 14(3), pp. 479–499. 2014. DOI:10.12989/sss.2014.14.3.479
- [2] Rainieri, C., Fabbrocino, G. "Estimating the elastic period of masonry towers". In R. Allemang, J. De Clerck, C. Niezrecki, & J. R. Blough (Eds.), *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series* (Vol. 5, pp. 243–248). New York, NY: Springer New York. 2012. DOI:10.1007/978-1-4614-2425-3\_22
- [3] Shakya, M., Varum, H., Vicente, R., Costa, A. "Empirical Formulation for Estimating the Fundamental Frequency of Slender Masonry Structures". *International Journal of Architectural Heritage*, 10(1), pp. 55–66. 2016. DOI:10.1080/15583058.2014.951796
- [4] Bartoli, G., Betti, M., Facchini, L., Marra, A. M., Monchetti, S. "Bayesian model updating of historic masonry towers through dynamic experimental data". *Procedia Engineering*, 199, pp. 1258–1263. 2017. DOI:10.1016/j.proeng.2017.09.267
- [5] Gentile, C., Saisi, A. "Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment". *Constr Build Mater*, 21, pp. 1311–1321. 2007. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.01.007
- [6] Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunişik, A. C., Yildirim, F. "Modal parameter identification of Hagia Sophia bell-tower via ambient vibration test". *Journal of Nondestructive Evaluation*, 28(1), pp. 37–47. 2009. DOI:10.1007/s10921-009-0045-9
- [7] Foti, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N. I., Ivorra, S. *Structural identification and numerical models for slender historical structures. Civil and Environmental Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (Vol. 1). 2016. DOI:10.4018/978-1-4666-9619-8.ch007
- [8] Nohutcu, H., Demir, A., Ercan, E., Hokelekli, E., Altintas, G. "Investigation of a historic masonry structure by numerical and operational modal analyses". *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(13). 2015. DOI:10.1002/tal.1213
- [9] Hacrefendioğlu, K., Maraş, E. E. "Photogrammetry in Documentation and Ambient Vibration Test of Historical Masonry Minarets". *Experimental Techniques*, 40(6), pp. 1527–1537. 2016. DOI:10.1007/s40799-016-0137-2
- [10] Diaferio, M., Foti, D., Gentile, C., Giannoccaro, N. I., Saisi, A. "Dynamic testing of a historical slender building using accelerometers and radar". In *6th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2015*. 2015.
- [11] Livaoğlu, R., Baştürk, M. H., Doğangün, A., Serhatoğlu, C. "Effect of geometric properties on dynamic behavior of historic masonry minaret". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(6), pp. 2392–2402. 2016. DOI:10.1007/s12205-016-0622-2
- [12] Sevim, B., Bayraktar, A., Altunişik, A. C., Atamtürkür, S., Birinci, F. "Finite element model calibration effects on the earthquake response of masonry arch bridges". *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(7), pp. 621–634. 2011. DOI:10.1016/j.finel.2010.12.011
- [13] Oliveira, C., Cakti, E., Stengel, D., Branco, M. "Minaret behavior under earthquake loading: The case of historical Istanbul". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41, pp. 19–39. 2012. DOI:10.1002/eqe.1115
- [14] Mortezaei, A., Kheyroddin, A., Ronagh, H. R. "Finite element analysis and seismic rehabilitation of a 1000-year-old heritage listed tall masonry mosque". *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(5), pp. 334–353. 2012. DOI:10.1002/tal.599
- [15] D'Ambrisi, A., Mariani, V., Mezzi, M. "Seismic assessment of a historical masonry tower with nonlinear static and dynamic analyses tuned on ambient vibration tests". *Engineering Structures*, 36, pp. 210–219. 2012. DOI:10.1016/j.engstruct.2011.12.009
- [16] Milani, G., Casolo, S., Naliato, A., Tralli, A. "Seismic assessment of a medieval masonry tower in Northern Italy by limit, nonlinear static, and full dynamic analyses". *International Journal of Architectural Heritage*, 6(5), pp. 489–524. 2012. DOI:10.1080/15583058.2011.588987
- [17] Preciado, A. "Seismic vulnerability and failure modes simulation of ancient masonry towers by validated virtual finite element models". *Engineering Failure Analysis*, 57, pp. 72–87. 2015. DOI:10.1016/j.engfailanal.2015.07.030p
- [18] Valente, M., Milani, G. "Non-linear dynamic and static analyses on eight historical masonry towers in the North-East of Italy". *Engineering Structures*, 114, pp. 241–270. 2016. DOI:10.1016/j.engstruct.2016.02.004
- [19] Valente, M., Barbieri, G., Biolzi, L. "Seismic assessment of two masonry Baroque churches damaged by the 2012 Emilia earthquake". *Engineering Failure Analysis*, 79(September 2016), pp. 773–802. 2017. DOI:10.1016/j.engfailanal.2017.05.026
- [20] Minghini, F., Milani, G., Tralli, A. "Seismic risk assessment of a 50m high masonry

- chimney using advanced analysis techniques". *Engineering Structures*, 69, pp. 255–270. 2014. DOI:10.1016/j.engstruct.2014.03.028
- [21] Pintucchi, B., Zani, N. "Effectiveness of nonlinear static procedures for slender masonry towers". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(6), pp. 2531–2556. 2014. DOI:10.1007/s10518-014-9595-z
- [22] Nohutcu, H., Hokelekli, E., Ercan, E., Demir, A., Altintas, G. "Collapse mechanism estimation of a historical slender minaret". *Structural Engineering and Mechanics*, 64(5), pp. 653–660. 2017. DOI:10.12989/sem.2017.64.5.653
- [23] Hejazi, M., Moayedian, S. M., Daei, M. "Structural Analysis of Persian Historical Brick Masonry Minarets". *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(2), pp. 4015009. 2016. DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000746
- [24] Kocatürk, T., Erdoğan, Y. S. "Earthquake behavior of M1 minaret of historical Sultan Ahmed Mosque (Blue Mosque)". *Structural Engineering and Mechanics*, 59(3), pp. 539–558. 2016. DOI:10.12989/sem.2016.59.3.539
- [25] Erdogan, Y. S., Kocatürk, T., Demir, C. "Investigation of the Seismic Behavior of a Historical Masonry Minaret Considering the Interaction with Surrounding Structures". *Journal of Earthquake Engineering*. 2017. DOI:10.1080/13632469.2017.1309725
- [26] Ubertini, F., Comanducci, G., Cavalagli, N., Laura Pisello, A., Luigi Materazzi, A., Cotana, F. "Environmental effects on natural frequencies of the San Pietro bell tower in Perugia, Italy, and their removal for structural performance assessment". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 82, pp. 307–322. 2017. DOI:10.1016/j.ymssp.2016.05.025
- [27] Haciefendioğlu, K., Maraş, E. E. "Photogrammetry in Documentation and Ambient Vibration Test of Historical Masonry Minarets". *Experimental Techniques*, 40(6), pp. 1527–1537. 2016. DOI:10.1007/s40799-016-0137-2
- [28] Diaferio, M., Foti, D., Giannoccaro, N. I. "Modal parameters identification on environmental tests of an ancient tower and validation of its FE model". *International Journal of Mechanics*, 10, pp. 80–89. 2016.
- [29] Bayraktar, A., Çalik, İ., Türker, T., Ashour, A. "Restoration effects on experimental dynamic characteristics of masonry stone minarets". *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 51(6). 2018. DOI:10.1617/s11527-018-1272-2
- [30] Erdil, B., Tapan, M., Akkaya, İ., Korkut, F. "Effects of structural parameters on seismic behaviour of historical masonry minaret". *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2018. DOI:10.3311/PPci.10687
- [31] Casolo, S., Uva, G. "Non-linear dynamic analysis of masonry towers under natural accelerograms accounting for soil-structure interaction". *ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Proceedings - An IACM Special Interest Conference*, (January), pp. 4488–4506. 2013. DOI:10.7712/120113.4826.c1342
- [32] Casolo, S., Diana, V., Uva, G. "Influence of soil deformability on the seismic response of a masonry tower". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(5), pp. 1991–2014. 2017. DOI:10.1007/s10518-016-0061-y
- [33] Casolo, S., Uva, G. "Non-Linear Dynamic Analysis of Masonry Towers Under Natural Accelerograms Accounting for Soil-Structure Interaction". *ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Proceedings - An IACM Special Interest Conference*, (May 2017), pp. 4488–4506. 2013. DOI:10.7712/120113.4826.c1342
- [34] Ptilakis, D., Karatzetzou, A. "Dynamic stiffness of monumental flexible masonry foundations". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(1), pp. 67–82. 2015. DOI:10.1007/s10518-014-9611-3
- [35] Ceroni, F., Sica, S., Rosaria Pecce, M., Garofano, A. "Evaluation of the natural vibration frequencies of a historical masonry building accounting for SSI". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 64, pp. 95–101. 2014. DOI:10.1016/j.soildyn.2014.05.003
- [36] "Abaqus v10, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA.". 2010.
- [37] Rayhani, M. H., El Naggar, M. H. "Numerical Modeling of Seismic Response of Rigid Foundation on Soft Soil". *International Journal of Geomechanics*, 8(6), pp. 336–346. 2008. DOI:10.1061/(asce)1532-3641(2008)8:6(336)
- [38] European Committee for Standardization, Eurocode 6, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1996.
- [39] P.B. Lourenço, G. Vasconcelos, L. R. "Assessment of the Stability Conditions of a Cistercian Cloister", (January), pp. 669- 678. 2001.
- [40] Kramer, S.L. (1999). Geotechnical earthquake engineering (university of Washington).
- [41] ARTeMIS Modal Pro 3.0, 2014, <http://www.svibs.com>.

## The Effect of Soil-Structure Interaction on Earthquake Behavior of Historical Masonry Minarets

### Extended abstract

Historical buildings are our cultural heritage that contributes to the economy of its region and serves as a bridge between past and present. Some of the historical buildings, which were exposed to natural disasters such as earthquakes, floods, winds during their lifetime, were destroyed and some of them were severely damaged. For this reason, historical buildings should be protected in order to hand them safely to future generations. Among these historical buildings, minarets are may be the most vulnerable ones under dynamic effects such as earthquakes and winds due to their long and fragile structures. There are many studies concerning determination of seismic behavior of minaret and tower type structures in the literature. However, ground motions in earthquake can have a significant impact on the structure behavior, especially in masonry structures built on flexible ground. Structure-ground interaction plays an important role in determining the behavior of the structures under earthquake effects. In this study, the seismic behavior of a historical masonry minaret under clastic and fixed support conditions was investigated for horizontal, horizontal+vertical ground motion components. Operational modal analysis method, which has been commonly used in literature, was used in order to determine experimental dynamic characteristics of the minaret. Vibrations created by the environmental effects such as vehicles and people were recorded by precision accelerometers, and the dynamic characteristics (mode shapes, frequency values) of the minaret were obtained by ArteMIS software. Theoretical mode forms and frequency values of the structure were obtained using ABAQUS V10. There was a difference between theoretical and experimental frequency values. The finite element model of the structure was calibrated by approximating theoretical frequencies to experimental results. Calibrated finite element model of the structure was used in the linear earthquake analysis in time history. East-west (E-W) and vertical (V) components of the acceleration records of Afyon Dinar earthquake which took place on 10.10.1995 ( $M_w = 6.1$ ), were used in the earthquake analyzes. The effect of soil-structure interaction on the structure behavior was investigated separately for applying conditions of horizontal and horizontal+vertical acceleration records., Effect of the ground on the seismic behavior of the structure was evaluated by comparing the results obtained from the analyzes. The examination of the modal analysis results shows that the frequency values decreased from hard ground to soft ground, and ground significantly

affected the dynamic characteristics of the structure. Additionally, it was found that the frequency values in fixed support and hard ground environments are close to each other, and concluded that the floor where the minaret was located had hard floor properties. It was determined that the maximum displacement in the minaret under the horizontal seismic forces increased from the hard ground to the soft ground and the maximum value was obtained with soft ground. It was also determined that the maximum displacement in the minaret was reduced from the hard ground to the soft ground, when the horizontal and vertical earthquake components were applied together and the minimum value was obtained with soft ground. It was found in the case of fixed support that the maximum (tensile) and minimum (pressure) principle stresses due to horizontal ground motion were concentrated around the door at the bottom of the minaret. In ground models, it was observed the stress values decreased from hard ground to soft ground. For horizontal+vertical ground motion, it was determined in the case of fixed support that maximum and minimum principal stresses were around 6.78MPa and 7.7MPa, respectively. It was found for horizontal ground motion that the difference between the maximum (tensile) stresses occurring with hard and soft ground was 4.23MPa, and this difference decreased to 2.96MPa for horizontal+vertical ground motion. In the case of horizontal ground motion, the difference between the minimum stresses in hard and soft ground conditions was 5.69MPa, and the same difference for horizontal+vertical ground motion was 4MPa. Considering the structure-ground interaction, it was found that vertical ground motion significantly affected the displacement behavior of the minaret. When the effects of horizontal and horizontal+vertical ground motions on the stresses were compared, it was found that the stress values were decreased in the case of horizontal+vertical ground motion. Consequently, it can be indicated that it was important to take structure-ground interaction and the vertical ground motion component into consideration in determination of earthquake behavior of minarets. Moreover, it is recommended to perform linear and nonlinear dynamic analysis of structure-ground interaction system of many historical masonry minarets under different earthquake records and with different soil characteristics in order to generalize the results.

**Keywords:** Soil-structure interaction, Historic masonry minaret, Finite element analysis, Horizontal ground motion, Earthquake behavior.

## Trend Tespiti Yapılmış Akım Gözlem İstasyonlarında Güncel Durumun Belirlenmesi

### *Determination of Current Situation at Trend Observed Flow Observation Stations*

Nadire Üçler

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, İnşaat Bölümü, Van, nadireucler@yyu.edu.tr

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*

Geliş: 12 Kasım 2019  
Düzeltilme: 5 Ocak 2020  
Kabul: 27 Ocak 2020

*Anahtar kelimeler:*

Trend analizi, Sen'in T testi, Spearman'ın Rho testi, Mann-Kendall mertebeye korelasyon testi

#### ÖZET

Bu çalışma ile, Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından işletilen akım gözlem istasyonlarının 1964 ve 2000 yılları arasındaki verileri kullanılarak hemen hemen bütün aylarında trend tespiti yapılmış istasyonların 2000 yılından sonraki akım durumları incelenmiştir. Bu amaçla, Susurluk havzası sınırları içerisinde yer alan 311 numaralı istasyon, Sakarya havzasında yer alan 1203 ve 1224 numaralı istasyonlar, Yeşilirmak havzası içinde bulunan 1401 ve 1402 numaralı istasyonlar, Doğu Akdeniz havzasında yer alan 1714 numaralı istasyonlar kullanılmıştır. Akım verilerinin güncel durumlarının tespit edilebilmesi için istasyonların son 31 yıllık verisine Sen'in T ve Spearman'ın Rho testleri uygulanmıştır. Ayrıca verilerin bütün olarak değerlendirilebilmesi için aynı yöntemler tüm veriye de uygulanmıştır. Trend başlangıç yılları Mann-Kendall Mertebeye Korelasyon testi kullanılarak, trendlerin lineer eğimleri, Sen'in trend eğim metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, trend metodları aynı verinin farklı dönemlerine uygulandığında, tam tersi yönde eğilim belirlenebildiği ya da eğim değerlerinde belirgin değişimler yaşanabildiği görülmüştür. Özellikle uzun süreli veriye sahip istasyonlarda daha kısa süreli son dönem verisine de trend analizi uygulanarak güncel durumun araştırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Tespit edilen trendler çoğunlukla azalan yönde olup trend başlangıç yıllarında 1980'li yıllar çoğunluktadır.

*Doi: 10.24012/dumf.645717*

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 12 December 2019  
Revised: 5 January 2020  
Accepted: 27 January 2020

*Keywords:*

Trend analysis, Sen's T test, Spearman's Rho test, Mann-Kendall rank correlation test

#### ABSTRACT

In this study, the current situations of the stations in which trend detected in almost all months in the study conducted using flow data between 1964 and 2000 is examined. For this purpose, station 311 within the boundaries of Susurluk basin, stations 1203 and 1224 in Sakarya basin, stations 1401 and 1402 in Yeşilirmak basin and stations 1714 in East Mediterranean basin were used. Sen's T and Spearman's Rho tests were applied to the last 31 years data of the stations in order to determine the current status of the flow data. Also to evaluate the data as a whole same methods were applied to all data too. Trend start years were calculated using Mann-Kendall Rank Correlation test and linear slope of trends were calculated using Sen's trend slope method. As a result of the study, when trend methods are applied to different periods of the same data, it is seen that trend can be determined in opposite direction or significant changes in slope values can be observed. It is concluded that the current situation should be investigated by applying trend analysis to shorter last term data especially in the stations with long term data. The trends are mostly declining and 1980s are the majority in the beginning of the trend.

\* Sorumlu yazar / Correspondence  
Nadire ÜÇLER  
✉ nadireucler@yyu.edu.tr  
Tel: +904322251414

## Giriş

Trend analiz metotları, zaman serilerindeki bir değişkenin eğilimini inceleyen yöntemlerdir. Bir zaman serisinde, ilgili değişkeninin yıllar içinde artan ya da azalan eğilim gösterip göstermediği veya sabit kalıp kalmadığını incelerler. Eğilim belirleme ve tespit edilen bir eğilimin istatistiksel önemini analiz etmek amacıyla kullanılan parametrik ve parametrik olmayan yöntemlerin her ikisinin de artıları ve eksileri vardır. Bu sebeple çalışma için hangi yöntemin seçileceği veri kümesinin özelliklerine ve koşullara bağlıdır [1].

Parametrik yöntemlerin aksine eksik, kısıtlı veya bağımlı verilere de uygulanabilen non-parametrik metotlar eksik verisi olabilen ve genellikle normal dağılmayan hidro-meteorolojik verilere uygulanabilmektedir [2-4].

Küresel iklim değişikliği ve bunun etkilerine olan ilginin artması sonucu sıcaklık [5-8], yağış [9-16], nem [17,18], kar [19, 20], buharlaşma [21], güneşlenme süresi [22, 23], akış [24-27] gibi parametrelere trend analiz metotları sıklıkla uygulanmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, daha önce Özel tarafından [28], istasyonların açıldığı tarihten çalışmanın yapıldığı tarihe kadar olan (1964 ve 2000 yılları arası) ortalama aylık akım verileri kullanılarak hazırlanmış tez çalışmasında hemen hemen bütün aylarda azalan ya da artan trend tespit edilen istasyonların 2000 yılından sonraki akım verilerinin daha önce belirlenen trende uygun

gerçekleşip gerçekleşmediğini araştırmaktır. Trend metotlarının uygulanabilmesi için en az 30 yıllık veriye ihtiyaç olduğundan istasyonların son durumlarının belirlenebilmesi için istasyona ait 1981-2011 yılları arasındaki son 31 yıllık veriye seçilen yöntemler uygulanmıştır. Ayrıca veriyi bir bütün olarak değerlendirebilmek için istasyonların açıldığı ve kapandığı tarihler arasındaki tüm veriye (1964-2011) trend belirleme metotları uygulanmıştır. Trend belirlenen aylar için trend eğimleri ve trend başlangıç yılları hesaplanmıştır.

## Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında, Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) tarafından işletilmiş olan istasyonlara ait veriler Devlet Su İşleri Akım Gözlem Yıllıklarından temin edilerek kullanılmıştır [29]. Trend metotları Susurluk havzası sınırları içerisinde yer alan ve daha önce yapılan çalışmada 9 ayda azalan trend tespit edilen 311 numaralı istasyon, bütün aylarda azalan trend tespit edilen ve Sakarya havzasında yer alan 1203 ve 1224 numaralı istasyonlar, 7 ayda artan 3 ayda azalan trend tespit edilen, Yeşilirmak havzası içinde bulunan 1401 numaralı istasyon ve aynı havzada 6 ayda artan trend tespit edilen 1402 numaralı istasyon ve 8 ayda azalan trend tespit edilen, Doğu Akdeniz havzasında yer alan 1714 numaralı istasyona uygulanmıştır. İstasyonların Türkiye haritası üzerindeki yerleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan istasyonlar

Figure 1. Stations used in the study

Bu araştırmada, nehir akımları aylık verilerinin trend analizini yapmak için Sen'in T, Spearman'ın Rho testleri, trendlerin eğimlerini belirlemek için Sen'in Trend Eğim metodu ve trend başlangıç yıllarının belirlenmesi amacıyla da Mann-Kendall Meritebe Korelasyon testi kullanılmıştır.

### Sen'in T Testi

1968 yılında Sen [30] tarafından önerilmiş ve 1980 yılında Farrell tarafından geliştirilmiş olan Sen'in T testi sıralı bir rank testidir [3]. Test istatistiği, dağılımdan bağımsızdır ve mevsimsel olaylardan etkilenmez, aşağıda verilen işlem sırasıyla hesaplanabilir:

Burada; i: yıllar (i = 1, 2, ....., n) ve j: aylar (j = 1, 2, ..., 12) olmak üzere;  $X_{ij}$ , akım gözlem istasyonunda ölçülen debi değeridir.

j ayın ortalaması denklem 1 ile ifade edilir.

$$X_{.j} = \frac{\sum_i X_{ij}}{n} \quad (1)$$

Mevsimsellik etkisini yok etmek için n yıllık dataların her bir ayından o ayın ortalaması çıkarılarak  $X_{ij} - X_{.j}$  hesaplanır. 1'den başlayıp  $12 \times n$ 'e kadar olan tüm farkların sırası (2) denklemi kullanılarak belirlenir.

$$R_{ij} = \text{Rank}(X_{ij} - X_{.j}) \quad (2)$$

Her bir ayın ranklarının ortalaması (3) denklemi, her bir yılın ranklarının ortalaması ise (4) denklemi kullanılarak hesaplanır.

$$R_{.j} = \frac{\sum_i R_{ij}}{n} \quad (3)$$

$$R_i = \frac{\sum_j R_{ij}}{n} \quad (4)$$

Sonuç olarak Sen'in T test istatistiği denklem 5 kullanılarak hesaplanır. (Burada m = 1'dir.)

$$T = \left[ \frac{12m^2}{n(n+1) \sum_{i,j} (R_{ij} - R_{.j})^2} \right]^{1/2} \left[ \sum_{i=1}^n \left( i - \frac{n+1}{2} \right) \left( R_i - \frac{nm+1}{2} \right) \right] \quad (5)$$

Mutlak T değerinin, belirlenen  $\alpha$  önem seviyesine karşılık gelen normal dağılım değeri z'den büyük olması halinde, trendin olmadığı varsayımının yapıldığı  $H_0$  hipotezi reddedilerek belirgin bir trendin olduğu tespit edilmiş olur.

### Spearman'ın Rho Testi

Bu test sıra istatistiğine dayanır. Veri serisinde lineer trend varlığını belirlemek amaçlı kullanılan basit bir yöntemdir.  $R_{(xi)}$  sıra istatistiğini ifade eder. Veriler küçükten büyüğe ya da tam tersi şekilde sıralanarak belirlenir. Gözlem serisi  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  vektörü şeklindedir.  $H_0$  (sıfır) ve  $H_1$  (alternatif) olmak üzere iki hipotez tanımlanır.  $H_0$  hipotezine göre  $x_i$  (i=1, 2, 3, ....., n) eş olasılıklı dağılımlardır.  $H_1$  hipotezine göre ise  $X_i$  (i=1, 2, 3, ....., n) zaman içinde artar ya da azalır. Testi istatistiği  $r_s$ , aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$r_s = 1 - 6 \frac{\sum_{i=1}^n (R(x_i - i))^2}{(n^3 - n)} \quad (6)$$

( $X_i$ ), i. verinin sıra numarasını; i, verilerin ölçüm sırasını; n, toplam gözlem adedini ifade etmektedir [31]. Spearman, belirli bir önem seviyesinde sıra sayıları arasında korelasyon olmadığını gösteren maksimum  $r_s$  değerlerini bir tablo ile vermiştir.  $n > 30$  için  $r_s$  dağılımının normale yaklaşacağı kabulü ile sonuçlar için normal dağılım tabloları kullanılabilir [32]. Böylelikle,  $r_s$ 'nin test istatistiği z, (7) numaralı denklemle bulunur.

$$z = r_s \sqrt{1/(n - 1)} \quad (7)$$

Mutlak z değerinin belirlenen  $\alpha$  önem seviyesindeki  $z_\alpha$  değerinden büyük olması durumunda  $X_i$ 'lerin eş dağılımlı olduğu hipotezi reddedilir böylece bir trend olduğu tespit edilmiş olur.

### Sen'in Trend Eğim Metodu

Bu metod trendlerin birim zamandaki değişimini belirlemek için kullanılan parametrik olmayan bir testtir (Sen 1968). Bu yöntem, verilerin hatalı ya da eksik olabileceği veri setlerine de uygulanabilmektedir.  $x_j$  ve  $x_k$ , j ve k zamanlarındaki verileri ifade etmektedir. j > k olmak üzere;  $N = n(n-1)/2$  adet  $Q_i$  (i = 1, 2, ....., N) değeri, (8)'deki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.  $Q_i$  değerleri küçükten büyüğe doğru ( $Q_1 \leq Q_2 \leq Q_3 \leq \dots \leq Q_{N-1} \leq Q_N$ ) şeklinde sıralanmaktadır.

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (8)$$

$Q_i$ 'lerin belirlenmesi ve sıralanmasının ardından,  $N$  tek ise (9), çift ise (10) denklemi kullanılarak,  $N$  adet  $Q_i$  değerinin medyanı alınır. Böylece söz konusu gözlemin lineer eğimleri belirlenmiş olur.

$$Q = \{Q_{(N+1)/2}\} \quad (9)$$

$$Q = \left\{ \frac{1}{2} [Q_{(N)/2} + Q_{(N+2)/2}] \right\} \quad (10)$$

### Mann-Kendall Mertebe Korelasyon İstatistiği

Parametrik olmayan bu test, söz konusu seride zaman içinde artma ya da azalma eğilimi olup olmadığını tespit etmek amacıyla kullanılır. Testin sonucu ve varsa trendin başlangıç noktası grafik üzerinden belirlenir. Testte reel veri kullanmak yerine, verinin serideki mertebesi ( $y_i$ ) ile işlem yapılır. Her bir  $y_i$  önceki mertebelerden büyükler sayılarak  $n_i$  gibi bir sayı ile ifade edilir. Test istatistiği olan  $t$ 'yi hesaplamak için  $n_i$ 'ler toplanır.

$$t = \sum_{i=1}^n n_i \quad (11)$$

Bunun ortalama ve varyansı, Mann-Kendall test istatistiği  $u(t)$  sırasıyla,

$$E(t) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (12)$$

$$\text{var } t = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (13)$$

$$u(t) = [t - E(t)] / \sqrt{\text{var } t} \quad (14)$$

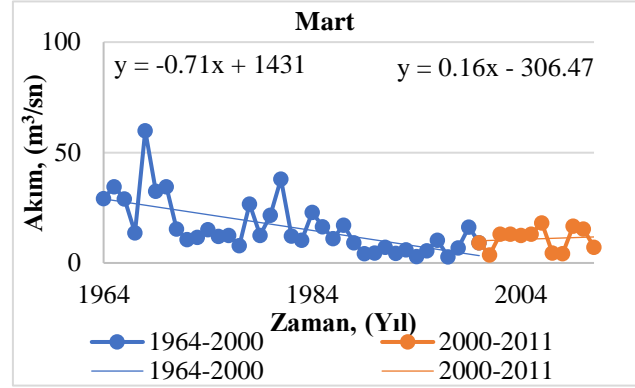
şeklinde hesaplanır [33].

Verilerde zaman içinde değişim olmadığı varsayımını,  $u(t)$ 'nin sifıra yakın olduğu değerler gösterirken  $u(t)$ 'nin büyük değerleri değişim olduğunu belirtir.  $\pm 1.96$  değerine ulaşan  $u(t)$  değeri trendin %95 önemlilik seviyesine ulaştığına işaret eder.  $u'(t)$  veri serisi içinde ters istikamette  $u(t)$  ile aynı yöntemle hesaplanır.  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafiğinde, önce birbirlerine yaklaştıkları sonra ise uzaklaştıkları nokta değişimin başlangıcına işaret eder trend başlangıç noktasını ve trendin kuvvetini gösterir. Ancak belirgin bir trend olmadığında  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafikleri birbirlerine birçok defa yakın salınımlar gösterirler.

### Bulgular

Şekil 2'de yer alan grafikte, Özel [28] tarafından yapılan çalışmada bütün aylarda azalan trend tespit edilen 1203 numaralı istasyonun mart ayına ait 2000 yılı öncesi ve sonrası akım değerleri ve

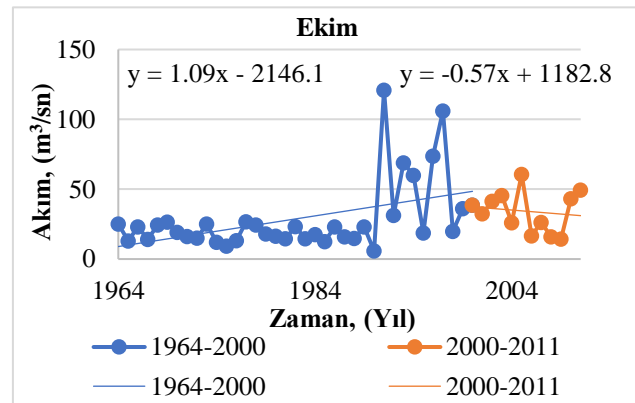
eğilim çizgileri görülmektedir. 2000 yılına kadar olan verilerde azalma eğilimi görülürken 2000 yılından sonraki değerlerde artan bir eğilim görülmesi akla akım verilerinin belirlenen trend sonucuna aykırı olarak gerçekleşmiş olabileceği durumunu getirmiştir.



Şekil 2. 1203 no.lu istasyon, mart ayı, 2000 yılı öncesi ve sonrası akım değerleri ve eğilim çizgileri

Figure 2. Station 1203, March, pre-2000 and post-2000 flow values and inclination lines

Benzer şekilde daha önceki çalışmada artan trend tespit edilen Yeşilirmak havzası 1401 numaralı istasyona ait grafik (Şekil 3) incelendiğinde 2000 yılına kadar artan eğilim gösteren akım değerlerinin 2000 yılından sonra azalan yönde eğilim göstermesi daha önce trend belirlenmiş istasyonlarda son yıllarda istatistiki olarak anlamlı trend olup olmadığının araştırılması gerekliliğini doğurmuştur.



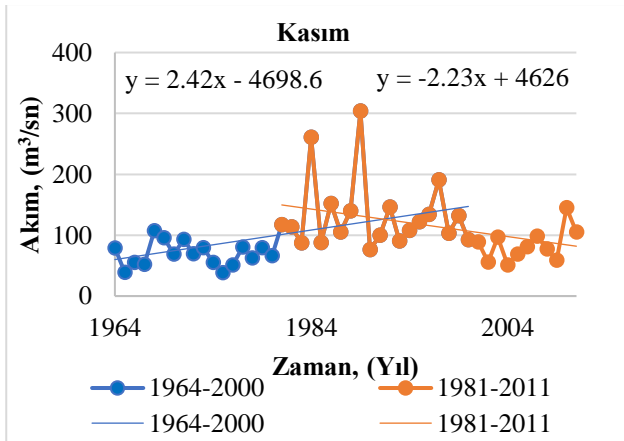
Şekil 3. 1401 no.lu istasyon, ekim ayı, 2000 yılı öncesi ve sonrası akım değerleri ve eğilim çizgileri

Figure 3. Station 1401, October, pre-2000 and post-2000 flow values and inclination lines

Söz konusu istasyonlara ait 1964 ve 2000 yılları arasını kapsayan 37 yıllık ilk çalışma sonuçları (ilk dönem), istasyonların son veri aldığı 2011 yılına kadar olan son durumu belirtmesi açısından 1981-2011 arasına ait 31 yıllık verilerin sonuçları (son dönem) ve mevcut bütün veriyi değerlendirmek amaçlı 1964 ve 2011 yılları arasına ait 48 yıllık veri sonuçları (uzun dönem) karşılaştırmalı olarak grafik ve tablolar yardımıyla havza bazında açıklanmıştır. Tablolarda karmaşıklığa sebep olmamak için sadece Spearman'ın Rho test istatistiği sonuçlarına, trend başlangıç yıllarına ve eğim değerlerine yer verilmiştir. Artan trendler ( $\uparrow$ ), azalan trendler ( $\downarrow$ ) ve trend belirlenemeyen aylar ise ( $\leftrightarrow$ ) simgesiyle ifade edilmiştir.

### Yeşilirmak Havzası Trend Sonuçları

Bu çalışmada, ilk dönemdeki verilerde çok sayıda ayda trend tespit edilen ve 2011 yılına kadar düzenli ölçüm yapılan 1401 ve 1402 numaralı istasyonlar incelenmiştir. Şekil 4'te 1402 numaralı istasyon, kasım ayı, ilk ve son dönem akım değerleri ve eğilim çizgileri gösterilmektedir. 2000 yılına kadar olan kısımda belirgin şekilde artan eğilim gösteren verilerin son döneme bakıldığında azalan eğilim gösterdiği görülmektedir.

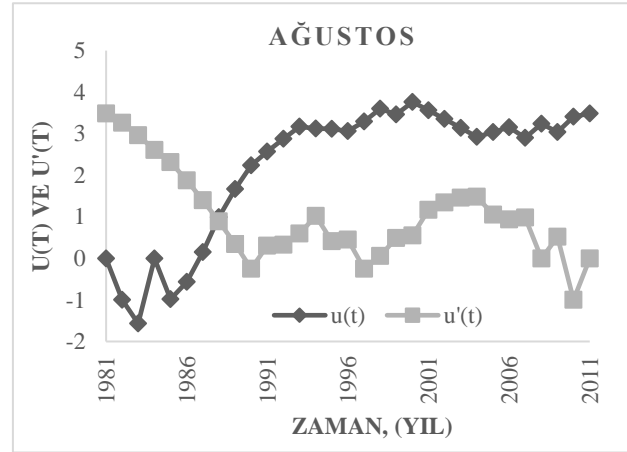


Şekil 4. 1402 numaralı istasyon, kasım ayı, ilk ve son dönem akım değerleri ve eğilim çizgileri.

Figure 4. Station 1402, November, first and last period flow values and inclination lines

Şekil 5'te 1402 numaralı istasyon, son dönem, ağustos ayı, mertebeye korelasyon testi  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafiği gösterilmektedir. İki grafiğin kesim noktası trend başlangıç yılını belirtmektedir. Son

dönem için yapılan trend testinde trend başlangıç yılı 1988 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5. 1402 no.lu istasyon, son dönem, ağustos ayı, mertebeye korelasyon testi  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafiği

Figure 5. Station 1402, final period, August, rank correlation test  $u(t)$  and  $u'(t)$  graphs

Tablo 1 incelendiğinde, 1401 numaralı istasyonda her üç dönemde de mart ve nisan aylarında azalan temmuz, ağustos ve eylül aylarında artan trend tespit edilmiştir. Ekim, kasım, ocak ve mayıs aylarında 1964-2000 ve 1964-2011 arasında trend belirlenirken son dönemde trend tespit edilememiştir. Son dönem mayıs ayı  $r_s$  değeri (1.97) 1.96 değerinden az farkla büyük olduğundan ve Sen'in T testinde elde edilen test istatistiği değeri (1.00), 1.96 değerinden küçük olduğundan dolayı trend olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu istasyonda en yüksek eğim 1964-2000 döneminde nisan ayında -4.79 olarak tespit edilmiştir. Bu istasyonda genellikle trend başlangıç yılı olarak 1990'lı yıllar tespit edilmiştir.

1402 numaralı istasyonda kasım ayında ilk dönem için 2.01 eğim değeriyle artan, son dönemde -1.64 değeriyle azalan trend, uzun dönemde ise 0.75 değeriyle artan trend belirlenmiştir. 1402 numaralı istasyonda kasım ve ağustos aylarında her üç dönem için de trend tespit edilmiştir. İlk dönemde trend tespit edilemeyen nisan ayında 1981-2011 yılları arası için yapılan hesapta 1993 yılından itibaren başlayan azalan eğim tespit edilmiştir. Aynı zamanda bu eğim -5.01 değeriyle bu istasyonun en yüksek eğim değeridir.



Tablo 1. Yeşilirmak havzası trend analiz sonuçları

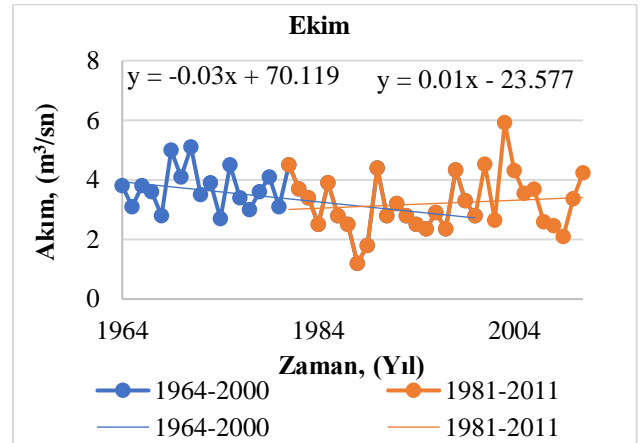
Table 1. Trend analysis results of Yeşilirmak basin

Aylar	Trend Tespiti			Trend Başlangıç Yılı			Trend Eğimi			
	1964-2000	1981-2011	1964-2011	1964-2000	1981-2011	1964-2011	1964-2000	1981-2011	1964-2011	
1401	Ekim	-2.31↑	-1.89↔	-3.10↑	1998		1988	0.35		0.41
	Kasım	-3.26↑	-0.88↔	-3.26↑	1993		1986	0.86		0.52
	Aralık	-2.73↑	-0.13↔	-1.34↔	1992			1.07		
	Ocak	-3.10↑	-1.55↔	-2.03↑	1993		1991	1.06		0.71
	Şubat	-1.94↔	-0.50↔	-0.90↔						
	Mart	3.15↓	2.19↓	3.36↓	1991	1992	1992	-1.81	-1.76	-1.72
	Nisan	3.62↓	3.34↓	4.97↓	1990	1992	1992	-4.79	-4.08	-4.33
	Mayıs	2.49↓	1.97↔	3.46↓	1990		1988	-3.16		-2.83
	Haziran	1.37↔	1.43↔	1.76↔						
	Temmuz	-3.24↑	-3.53↑	-4.60↑	1995	1990	1992	1.28	1.73	1.29
	Ağustos	-3.76↑	-3.38↑	-5.02↑	1990	1988	1988	1.00	1.96	1.30
	Eylül	-3.11↑	-3.20↑	-4.72↑	1991	1988	1992	0.70	1.64	1.02
1402	Ekim	-3.27↑	1.64↔	-1.88↔	1980			1.71		
	Kasım	-3.84↑	2.14↓	2.04↑	1981	1999	1977	2.01	-1.64	0.75
	Aralık	-1.74↔	1.68↔	-0.39↔						
	Ocak	-1.97↑	0.91↔	-0.62↔	1981			1.48		
	Şubat	-0.93↔	1.45↔	-0.32↔						
	Mart	1.89↔	1.13↔	1.69↔						
	Nisan	1.54↔	2.73↓	3.26↓		1993	1992		-5.01	-4.13
	Mayıs	0.62↔	1.73↔	2.00↓			1993			-2.60
	Haziran	-0.37↔	1.81↔	0.68↔						
	Temmuz	-3.22↑	-1.71↔	-3.58↑	1986		1986	2.04		1.54
	Ağustos	-4.30↑	-2.46↑	-4.63↑	1987	2004	1986	2.29	1.87	1.76
	Eylül	-4.06↑	-1.65↔	-4.17↑	1985		1983	1.85		1.28

### Susurluk Havzası Trend Sonuçları

Önceki çalışmada kullanılan istasyonlardan trend tespit edilenlerin bir kısmı düzensiz veri ölçümü yapıldığı için bir kısmı da 2000 yılından kısa bir süre sonra kapandığı için bu alışmada Susurluk havzasından sadece 311 numaralı istasyon kullanılmıştır.

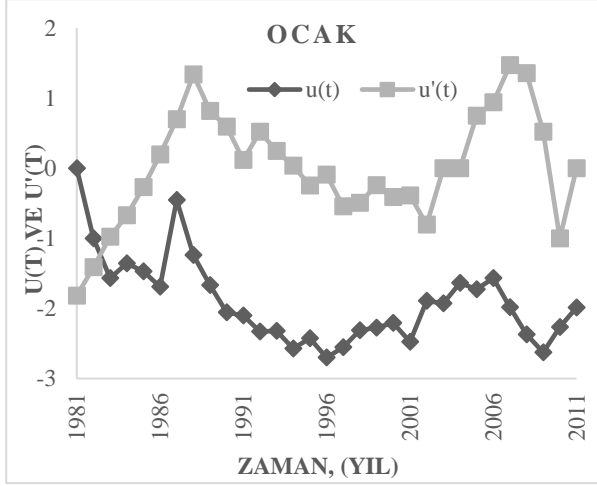
Şekil 6'da 311 no.lu istasyona ait ekim ayı, ilk ve son dönem akım değerleri ve eğilim çizgileri incelendiğinde 2000 yılına kadar olan kısımdaki küçük değerli de olsa azalma eğiliminin son dönemde yön değiştirdiği görülmektedir. Bu durum farklı dönemlerde farklı trend tespit edilebileceği fikrini desteklemiştir.



Şekil 6. 311 no.lu istasyon, ekim ayı, ilk ve son dönem akım değerleri ve eğilim çizgileri

Figure 6. Station 311, October, first and last period flow values and inclination lines

Şekil 7’de son dönem ocak ayı mertbe korelasyon testi grafik sonucu gösterilmektedir. Trend başlangıç yılı  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafiklerinin kesim noktası olan 1983 yılı olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. 311 no.lu istasyon, son dönem, ocak ayı, mertbe korelasyon testi  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafiği

Figure 7. Station 311, final period, January, rank correlation test  $u(t)$  and  $u'(t)$  graphs

Tablo 2 incelendiğinde ekim ayında ilk dönemde trend belirlenmiş olmasına rağmen son ve uzun dönemde trend tespit edilemediği görülmektedir. Her üç dönemde de trend tespit edilen ayların sadece aralık ve ocak ayları olduğu belirlenmiştir. Ağustos ve eylül aylarında üç dönemde de trend belirlenmemiş, ekim ayında sadece ilk dönemde trend belirlenirken nisan ayında ise uzun dönemde trend belirlenmiştir. Belirlenen bütün trendler azalan yöndedir. En yüksek eğim son dönemde ocak ayında -0.99 değeriyle tespit edilmiştir. Trend başlangıç yıllarında 1980’li yıllar ağırlıktadır.

Tablo 2. Susurluk havzası trend analizi sonuçları

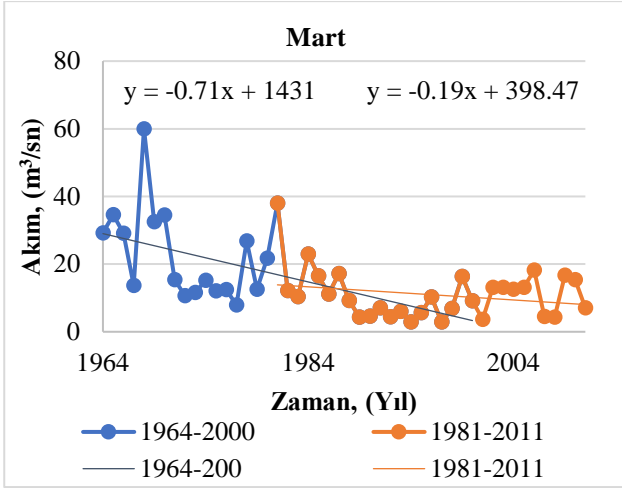
Table 2. Trend analysis results of Susurluk basin

İstasyon	Aylar	Trend Tespiti			Trend Başlangıç Yılı			Trend Eğimi		
		1964-2000	1981-2011	1964-2011	1964-2000	1981-2011	1964-2011	1964-2000	1981-2011	1964-2011
311	Ekim	2.74↓	-0.03↔	1.64↔	1981			-0.03		
	Kasım	3.48↓	1.29↔	3.55↓	1985		1985	-0.05		-0.04
	Aralık	4.00↓	2.53↓	4.56↓	1985	1985	1986	-0.15	-0.07	-0.11
	Ocak	3.46↓	2.12↓	4.16↓	1986	1983	1986	-0.19	-0.99	-0.15
	Şubat	3.18↓	1.42↔	3.56↓	1988		1986	-0.28		-0.22
	Mart	3.65↓	1.17↔	3.39↓	1982		1981	-0.40		-0.24
	Nisan	1.69↔	0.79↔	2.88↓			1971			-0.17
	Mayıs	3.21↓	1.67↔	4.17↓	1983		1984	-0.14		-0.12
	Haziran	3.01↓	1.2↔	3.53↓	1982		1984	-0.09		-0.07
	Temmuz	2.06↓	0.64↔	2.89↓	1976		1977	-0.03		-0.03
	Ağustos	1.32↔	-0.33↔	1.72↔						
Eylül	1.61↔	-1.87↔	1.14↔							

### Sakarya Havzası Trend Sonuçları

Sakarya havzası, 1203 no.lu istasyona ait ilk ve son dönem akım değerleri ve eğilim çizgilerinin gösterildiği Şekil 8 incelendiğinde son dönem eğilim çizgisinin ilk döneme göre

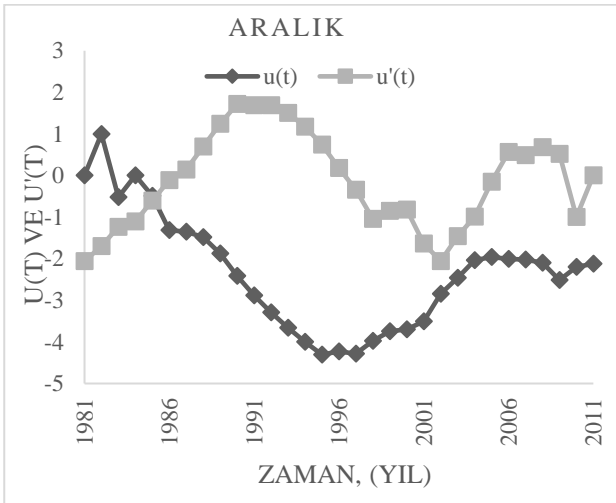
belirgin ölçüde azaldığı görülmektedir. Bu durum son dönemde veya uzun dönemde istatistiki olarak anlamlı trend bulunamayacağı ya da düşük eğimli trend tespit edilebileceğini göstermiştir.



Şekil 8. 1203 no.lu istasyon, mart ayı, ilk ve son dönem akım değerleri ve eğilim çizgileri

Figure 8. Station 1203, March, first and last period flow values and inclination lines

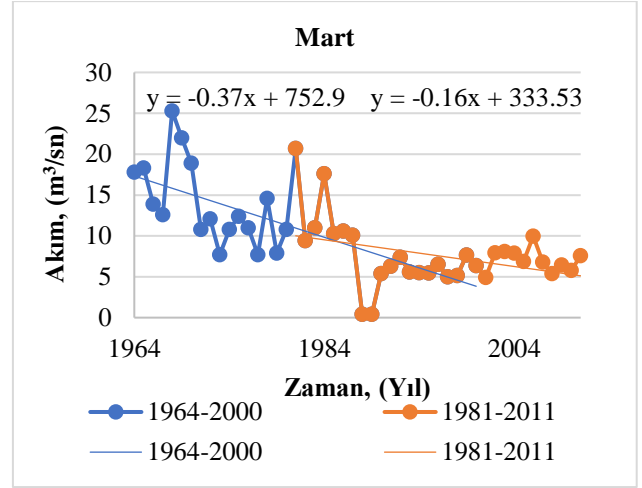
Şekil 9'da 1203 numaralı istasyon son dönem, aralık ayı, mertbe korelasyon testi  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafiği kesişimi görülmekte olup trend başlangıç yılı 1985 olarak belirlenmiştir.



Şekil 9. 1203 no.lu istasyon son dönem, aralık ayı, mertbe korelasyon testi  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafiği

Figure 9. Station 1203, final period, December, rank correlation test  $u(t)$  and  $u'(t)$  graphs

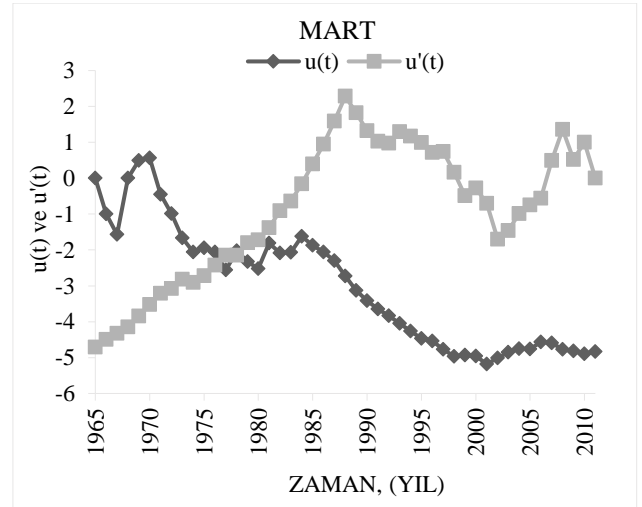
Sakarya havzası, 1224 no.lu istasyona ait ilk ve son dönem akım değerleri ve eğilim çizgilerinin gösterildiği Şekil 10 incelendiğinde son dönem eğilim çizgisinin ilk döneme göre belirgin ölçüde azaldığı görülmektedir. Bu durum uzun dönemde istatistiki olarak anlamlı trend bulunamayacağı ya da düşük eğimli trend tespit edilebileceğini göstermiştir.



Şekil 10. 1224 no.lu istasyon, mart ayı, ilk ve son dönem akım değerleri ve eğilim çizgileri

Figure 10. Station 1224, March, first and last period flow values and inclination lines

Şekil 11'da 1224 numaralı istasyon uzun dönem, mart ayı, mertbe korelasyon testi  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafiği kesişimi görülmekte olup trend başlangıç yılı 1977 olarak belirlenmiştir.



Şekil 11. 1224 no.lu istasyon son dönem, mart ayı, mertbe korelasyon testi  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafiği

Figure 11. Station 1224, long period, March, rank correlation test  $u(t)$  and  $u'(t)$  graphs

Tablo 3 incelendiğinde her iki istasyonda da ilk dönem eğimlerin son dönem ve uzun dönem eğim değerlerinden genellikle büyük olduğu görülmektedir. İlk dönem ve uzun dönemde bütün aylarda trend belirlenmiştir. Belirlenen bütün trendler azalan yöndedir ancak eğim değerleri çok yüksek değildir. En yüksek eğim

değeri 1203 numaralı istasyonda ilk dönem mart ayında -0.543 değeriyle hesaplanmıştır. Trend başlangıç yıllarında ağırlık yine 1980'li yıllarda olmakla birlikte 1224 numaralı istasyonun son döneminde belirlenen trendlerde 2000'li yılların

çoğunlukta olduğu görülmektedir. Ayrıca uzun dönemde her iki istasyonda da ilkbahar ve yaz aylarında 1970'li yıllardan başlayan trendler tespit edilmiştir.

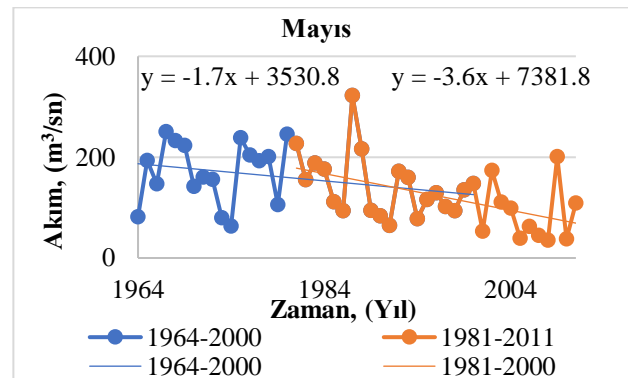
Tablo 3. Sakarya havzası trend analizi sonuçları

Table 3. Trend analysis results of Sakarya basin

İstasyon	Aylar	Trend Tespiti			Trend Başlangıç Yılı			Trend Eğimi		
		1964-2000	1981-2011	1964-2011	1964-2000	1981-2011	1964-2011	1964-2000	1981-2011	1964-2011
1203	Ekim	4.85↓	2.24↓	5.00↓	1984	1984	1983	-0.125	-0.052	-0.082
	Kasım	4.65↓	2.05↓	4.80↓	1986	1985	1984	-0.131	-0.067	-0.088
	Aralık	4.63↓	1.99↓	4.54↓	1987	1985	1985	-0.238	-0.074	-0.142
	Ocak	4.06↓	1.97↓	4.32↓	1988	1983	1984	-0.309	-0.120	-0.217
	Şubat	3.23↓	1.20↔	3.10↓	1986		1984	-0.323		-0.255
	Mart	4.18↓	0.46↔	2.99↓	1982		1972	-0.543		-0.295
	Nisan	2.49↓	0.92↔	3.06↓	1971		1971	-0.329		-0.258
	Mayıs	3.31↓	0.98↔	3.71↓	1981		1973	-0.264		-0.192
	Haziran	4.36↓	0.92↔	4.01↓	1979		1972	-0.260		-0.146
	Temmuz	4.72↓	1.70↔	4.59↓	1982		1976	-0.125		-0.080
	Ağustos	4.56↓	1.45↔	4.64↓	1982		1976	-0.095		-0.067
	Eylül	4.63↓	1.26↔	4.67↓	1982		1977	-0.100		-0.075
1224	Ekim	3.59↓	2.38↓	4.38↓	1984	2002	1985	-0.062	-0.049	-0.053
	Kasım	2.72↓	2.67↓	4.00↓	1986	2005	1993	-0.038	-0.048	-0.045
	Aralık	4.16↓	2.62↓	4.83↓	1985	2006	1986	-0.089	-0.068	-0.069
	Ocak	3.96↓	2.90↓	5.00↓	1986	2008	1987	-0.133	-0.079	-0.104
	Şubat	4.18↓	2.47↓	4.84↓	1986	2007	1986	-0.170	-0.083	-0.124
	Mart	4.86↓	1.65↔	4.80↓	1981		1977	-0.309		-0.175
	Nisan	3.37↓	1.11↔	3.87↓	1973		1973	-0.196		-0.155
	Mayıs	4.47↓	1.47↔	4.72↓	1981		1977	-0.175		-0.133
	Haziran	4.03↓	1.61↔	4.44↓	1973		1978	-0.113		-0.090
	Temmuz	4.70↓	2.25↓	4.97↓	1976	2007	1978	-0.098	-0.060	-0.073
	Ağustos	4.71↓	2.19↓	5.23↓	1977	2009	1981	-0.088	-0.050	-0.072
	Eylül	3.63↓	1.57↔	4.16↓	1982		1983	-0.066		-0.050

### Doğu Akdeniz Havzası Trend Sonuçları

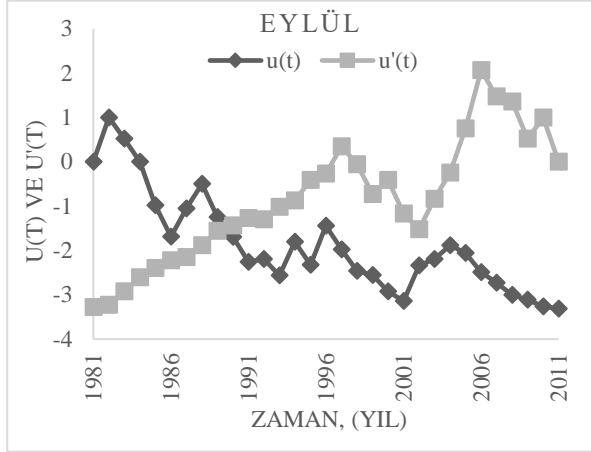
Doğu Akdeniz havzası 1714 numaralı istasyonun mayıs ayı ilk ve son dönem akım değerleri ve eğilim çizgilerinin yer aldığı Şekil 12 incelendiğinde ilk dönem ve son dönem eğilim çizgilerinin eğiminde belirgin fark olduğu görülmektedir. Bu durum daha önce trend belirlenemeyen aylarda son dönem veya uzun dönemde trend belirlenebileceği ya da belirlenen trend eğimlerinde belirgin farklar ortaya çıkabileceğini akla getirmiştir.



Şekil 12. 1714 no.lu istasyon, mayıs ayı, ilk dönem ve son dönem akım değerleri ve eğilim çizgileri.

Figure 12. Station 1714, May, first and last period flow values and inclination lines

Şekil 13'te 1714 numaralı istasyon son dönem, eylül ayı, mertebeye korelasyon testi  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafiği yer almakta olup  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafiklerinin kesim noktası olan 1989 yılı trend başlangıç yılı olarak belirlenmiştir.



Şekil 13. 1714 no.lu istasyon son dönem, eylül ayı, mertebeye korelasyon testi  $u(t)$  ve  $u'(t)$  grafiği

Figure 13. Station 1714, final period, September, rank correlation test  $u(t)$  and  $u'(t)$  graphs

Tablo 4 incelendiğinde kasım ayında hiçbir dönemde trend tespit edilemediği anlaşılmaktadır. Ayrıca ilk dönem ve son dönemde trend tespit edilemeyen aralık ayında uzun dönemde -1.2 eğim değeri ile 1991 yılından başlayan azalan trend tespit edildiği görülmektedir. İlk dönem trend tespit edilemeyen ocak ve nisan aylarında son dönem ve uzun dönem için yapılan hesapta yüksek eğimlerle azalan trend tespit edilmesi akım değerlerinde son dönemlerde belirgin değişim yaşandığına işaret etmektedir. İlk dönem trend tespit edildiği halde son dönemde trend tespit edilemeyen şubat ayında uzun dönem eğim değerinin ilk dönemden düşük olması son dönemde trend tespit edilememesini desteklemektedir. En yüksek eğim değeri nisan ayında son dönemde -5.643 değeriyle tespit edilmiştir. İlk dönemde trend başlangıç yıllarında ağırlık 1980'li yıllarda iken son dönemde 1990 yılları daha belirgindir.

Tablo 4. Doğu Akdeniz havzası trend analizi sonuçları  
Table 4. Trend analysis results of the Eastern Mediterranean basin

İstasyon	Aylar	Trend Tespiti			Trend Başlangıç Yılı			Trend Eğimi		
		1964-2000	1981-2011	1964-2011	1964-2000	1981-2011	1964-2011	1964-2000	1981-2011	1964-2011
1714	Ekim	3.05↓	4.18↓	5.02↓	1991	1995	1996	-0.500	0.7963	-0.645
	Kasım	-0.19↔	1.45↔	0.63↔						
	Aralık	1.06↔	1.51↔	2.33↓			1991			-1.200
	Ocak	1.89↔	2.55↓	3.04↓		1988	1991		-2.59	-2.567
	Şubat	1.96↓	1.39↔	2.62↓	1989		1987	-2.500		-1.818
	Mart	3.53↓	2.35↓	3.95↓	1989	1991	1984	-3.442	-2.137	-2.570
	Nisan	1.25↔	2.62↓	3.13↓		2004	1994		-5.643	-4.000
	Mayıs	1.96↓	2.80↓	3.73↓	1988	1994	1994	-2.212	-3.54	-2.763
	Haziran	2.95↓	3.45↓	4.53↓	1988	1988	1991	-1.177	-1.579	-1.294
	Temmuz	2.54↓	3.57↓	4.32↓	1985	1998	1989	-0.561	-0.788	-0.670
	Ağustos	3.18↓	3.29↓	4.63↓	1988	1992	1988	-0.500	-0.623	-0.541
	Eylül	3.53↓	3.26↓	4.72↓	1988	1989	1986	-0.490	-0.585	-0.500

## Sonuçlar

Çalışmada elde edilen en dikkat çekici sonuçlardan birisi Yeşilirmak havzası 1402 numaralı istasyon kasım ayında gerçekleşmiştir. İlk ve uzun dönemde artan trend tespit edilen bu

ayda son dönemde tam tersi yönde trend tespit edilmesi bu tür çalışmalarda veri aralığını tespit ederken dikkatli olunması gerektiğini ve özellikle uzun süreli verilerle yapılan analizlerde

ayrıca son dönem verileri için de hesap yapılması gerektiğini göstermiştir.

Susurluk havzası, 311 numaralı istasyonda ocak ayı için yapılan analizde son dönem için belirlenen trend eğim değeri uzun dönem için belirlenen trend eğim değerinden 6.6 kat fazla hesaplanmıştır. Bu durum akım verilerindeki azalma eğilimin son dönemde daha belirgin hale geldiğini göstermiştir.

Sakarya havzasında son dönemde trend tespit edilemeyen aylar incelendiğinde uzun dönem eğim değerlerinin ilk dönemde tespit edilen eğim değerlerinden küçük olduğu anlaşılmıştır. Bu durum son dönemde trend tespit edilememesini açıklar niteliktedir.

Uzun dönem için yapılan analizde trend başlangıç yılları incelendiğinde toplam 29 ayda 1980’li, 14’er ayda 1970’li ve 1990’lı yıllarda trend başlangıcı tespit edildiği görülmektedir. Bu sonuç, dünyada iklim değişikliği üzerine hazırlanan raporlarda insan faktörü sonucunda, yüzey sıcaklıklarının 1980’lerin başında belirginleşmesi sonucuyla uyumludur [34, 35].

Ayrıca Türkeş [36] tarafından ülkemizdeki iklim değişikliği ve kuraklık üzerine yapılan çalışmada, ısınma eğiliminin, şehirleşme seviyesi fark etmeksizin hemen hemen bütün istasyonlarda 1980’li yıllarla birlikte hızlandığı tespit edilmiş olup iklim değişikliği sinyali, kimi istasyonda 1980’li yılların ortasında, kimilerinde ise 1990’ların başında gerçekleştiği belirlenmiştir.

Aynı çalışmada Türkiye yağışlarındaki eğilimler incelenmiş olup kuraklaşma eğiliminin istasyonların bir kısmında 1970’li yılların başında, bir kısmında ise 1980’li yılların başında etkili olduğu tespit edilmiştir. 1980’li yıllarda azalan yağış ve artan sıcaklık değerleri tespit edilmiş olması akım değerlerinde özellikle 1980’li yıllarda başlayan azalan eğilimler tespit edilmesi sonucunu desteklemektedir.

Su kaynaklarının planlanmasında trend metodlarından yararlanılacağına, daha önce trend belirlenen bir istasyonda sonraki dönemde tam tersi bir eğilim görülebileceği, eğim değerlerinde belirgin değişimler yaşanabileceği ya da uzun süreli veride trend olmamasına

rağmen daha kısa süreli veride eğim belirlenebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle akım verisi için sonuçların bölgenin yağış ve sıcaklık trend sonuçları ile değerlendirilmesi gelecekle ilgili daha sağlıklı ipuçlarına ulaşmayı sağlayacaktır.

## Kaynaklar

- [1] Kumar, N., Tischbein, B., Beg, M. K., (2019). Multiple trend analysis of rainfall and temperature for a monsoon-dominated catchment in India, *Meteorology and Atmospheric Physics*, **131**, 1019–1033.
- [2] Huth, R, Pokorn, L., (2004). Parametric versus non-parametric estimates of climatic trends. *Theor Appl Climatol* **77**:107–112.
- [3] Van Belle, G. and Hughes, J. P., (1984). Nonparametric tests for trend in water quality, *Water Resour Res*, **20**, 1, 127-136.
- [4] Helsel, D. R., Hirsch, R. M., (1988). Applicability of the t-Test for Detecting Trends in Water Quality Variables by Robert H. Montgomery and Jim C. Loftis. *J Am Water Resour Assoc*, **24**, 201–204.
- [5] Zhang, X., Vincent, L. A., Hogg, W. D., Niitsoo, A., (2000). Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century, *Atmos Ocean*, **38**, 395–429.
- [6] Liu, R. Q., Jacobi, C., Hoffmann, P., Stober, G., Merzlyakov, E. G., (2010). A piecewise linear model for detecting climatic trends and their structural changes with application to mesosphere/lower thermosphere winds over Collm, Germany, *J Geophys Res*, **115**,1-10.
- [7] Weng, S. P., (2010). Changes of diurnal temperature range in Taiwan and their large-scale associations: univariate and multivariate trend analyses, *J Meteorol Soc Jpn Ser II*, **88**, 203–226.
- [8] Sansigolo, C. A., Kayano, M. T., (2010). Trends of seasonal maximum and minimum temperatures and precipitation in Southern Brazil for the 1913–2006 period, *Theor Appl Climatol*, **101**, 209–216.
- [9] Serrano, A., Garcia, A. J., Mateos, V. L., Cancillo, M. L., Garrido, J., (1999). Monthly modes of variation of precipitation over the Iberian peninsula, *J. Climate*, **12**: 2894-919.
- [10] Duhan, D., Pandey, A., (2013). Statistical analysis of long term spatial and temporal trends of precipitation during 1901–2002 at Madhya Pradesh, India, *Atmos Res*, **122**,136–149.

- [11] Limsakul, A., Singhruck, P., (2016). Long-term trends and variability of total and extreme precipitation in Thailand, *Atmos Res*, **169**, 301–317.
- [12] Partal, T., Kâhya, E., (2006). Trend analysis in Turkish precipitation data, *Hydrol Process*, **20**, 2011–2026.
- [13] Dash, S. K., Jenamani, R. K., Kalsi, S.R., Panda, S. K., (2007). Some evidence of climate change in twentieth-century India, *Clim Chang*, **85**, 299–321.
- [14] Subash, N., Ram Mohan, H. S., Sikka, A. K., (2011). Decadal frequency and trends of extreme excess/deficit rainfall during the monsoon season over diferent meteorological subdivisions of India, *Hydrol Sci J*, **56**, 7, 1090–1109.
- [15] Tabari, H., Taye, M. T., Willems, P., (2015). Statistical assessment of precipitation trends in the upper Blue Nile River basin, *Stoch Environ Res Risk Assess*, **29**, 1751.
- [16] Pingale, S., Adamowski, J., Jat, M., Khare, D., (2015). Implications of spatial scale on climate change assessments, *J Water and Land Dev*, **26**, 37–56.
- [17] Alobaidi, A. H., (2015). Analysis of relative humidity in Iraq for the period 1951-2010, *Int J Sci Res Publ*, **5**, 5, 515-524.
- [18] Wijngaarden, V., Vincent, L. A. (2003). Trends in relative humidity in Canada from 1953–2003. Report prepared for Climate Research Barnchm Meteorological Service, Canada.
- [19] Dyer, J. L., Mote, T. L., (2006). Spatial variability and trends in observed snow depth over North America, *Geophys Res Lett*, **33**, L16503.
- [20] Kunkel, K. E., Robinson, D. A., Champion, S., Yin, X., Estilow, T., Frankson, R. M., (2016). Trends and Extremes in Northern Hemisphere Snow Characteristic, *Curr Clim Chang Rep*, **2**, 65–73.
- [21] Chattopadhyay, N., Hulme, M., (1997). Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change, *Agric For Meteorol*, **87**, 55-73.
- [22] Aksoy, B., (1999). Analysis of changes in sunshine duration data for Ankara, Turkey, *Theor Appl Climatol*, **64**, 229–237.
- [23] Rahimzadeh, F., Pedrama, M., Kruk, M. C., (2014). An examination of the trends in sunshine hours over Iran, *Meteorol Appl*, **21**, 309–315.
- [24] Chiew, F. H. S., McMahon, T. A., (1993). Detection of trend or change in annual flow of Australian rivers, *Int J Climatol*, **13**, 643–653.
- [25] Douglas, E. M., Vogel, R. M. and Kroll, C. N., (2000). Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation, *J Hydrol*, **240**, 90–105.
- [26] Zhang, X., Harvey, K. D., Hogg, W. D., Yuzyk, T. R., (2001). Trends in Canadian streamflow, *Water Resour Res*, **37**, 987–998.
- [27] Kâhya, E., Kalaycı, S., (2004). Trend analysis of stream flow in Turkey, *J Hydrol*, **289**, 128–144.
- [28] Özel, N., (2004). Türkiyedeki nehir akımları aylık verilerinin parametrik olmayan yöntemlerle trend analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. Selçuk üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [29] DSİ, (2019). Akım gözlem yıllıkları, <http://www.dsi.gov.tr/faaliyetler/akim-gozlem-yilliklari>, (1.10.2019).
- [30] Sen, P. K., (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau, *J. Am. Stat. Assoc.*, **63**, 1379-1389.
- [31] Lettenmaier, D. P., (1976). Detection of trends in water quality data from records with dependent observations, *Water Resour Res*, **12**, 5, 1037-1046.
- [32] İçağa, Y., (1994). Analysis of trends in water quality using nonparametric methods. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [33] Sneyers, R., (1990). On the Statistical Analysis of Series of Observations. World Meteorological Organization, No.415, Geneva. 192.
- [34] IPCC. (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton, J.T., et al., Cambridge University Press: Cambridge and New York. 823.
- [35] IPCC. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., et al., Cambridge University Press: Cambridge and New York. 996.
- [36] Türkeş, M., (2012). Türkiye’de gözlenen ve öngörülen iklim değişikliği, kuraklık ve çölleşme, *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, **4**, 2, 1-32.

## Orta Karadeniz ve Doğu Karadeniz Bölgesinde kuraklık indisleri üzerine trend analizi uygulanması

### *Applying trend analysis on drought indices in the Central Black Sea and Eastern Black Sea Region*

Turgay Partal<sup>1\*</sup>, Ercan Yavuz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*

Geliş: 14 Kasım 2019  
Düzeltilme: 23 Nisan 2020  
Kabul: 23 Mayıs 2020

*Anahtar kelimeler:*

Orta ve Doğu Karadeniz, Standart yağış indisi, De-Martonne indisi, trend analizi

#### ÖZET

Bu çalışmada Orta Karadeniz ve Doğu Karadeniz Bölgesinde elde edilen kuraklık indisleri üzerine trend analizi yapılmıştır. Trend analizi için ilk önce sıcaklık ve yağış verileri kullanılarak standart yağış indisi ve De Martonne indisi elde edilmiştir. Gözlenmiş yağışlar üzerine Mann-Kendall testi uygulanmıştır. Daha sonra Mann-Kendall testi kuraklık indisleri üzerine uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan veriler 1960 ve 2015 yılları arasında verilere sahip 12 istasyona aittir. Trend analizine göre yıllık toplam yağışlarda tüm istasyonlar artan eğilim göstermiştir. Aylık yağışlarda Mart, Eylül ve Ekim aylarında önemli artış trendleri elde edilmiştir. Standart yağış indisi için Nemlilik sınıflarında genel olarak artış eğilimi vardır. Bunun yanında, yıllık DeMartonne indisinde bazı önemli artan trendler belirlenmiştir.

*Doi: 10.24012/dumf.646911*

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 14 December 2019  
Revised: 23 April 2020  
Accepted: 23 May 2020

*Keywords:*

Central and Eastern Black Sea, Standardized Precipitation index, De-Martonne index, Trend Analysis

#### ABSTRACT

In this study has been carried out to trend analysis on the drought indices obtained in the Central Black Sea and Eastern Black Sea Region. Firstly, for trend analysis, the standardized precipitation index and De Martonne index were obtained using the precipitation and temperature data. Mann-Kendall test was applied on the observed precipitation data. After then, the Mann-Kendall test was applied on the drought indexes. The data network used in this study consists of 12 stations spanning from 1960 to 2015. According to the trend analysis, all of the stations showed increasing trends in the annual total precipitation. For monthly precipitation data, the significant increasing trends were obtained in March, September and October. For standardized precipitation index, there is generally an increasing tendency in Wet classifications. Besides, some significant increasing trends were determined in annual De-Martonne indices.

\* Sorumlu yazar / Correspondence  
Turgay PARTAL  
✉ [turgay.partal@omu.edu.tr](mailto:turgay.partal@omu.edu.tr)



## Giriş

Kuraklık tüm canlıların yaşamını önemli derecede etkileyen doğal bir çevre olayıdır. Böylesine önemli olan kuraklığın her zaman ve her yerde geçerli olabilecek bir tanımı günümüze kadar yapılamamıştır. Genel olarak kuraklık yağmur veya kar yağışı eksikliği olarak tanımlanmaktadır. Kuraklığın diğer doğal afetlerden farkı, etkisini uzun zamanda ve daha yavaş olarak göstermesidir (Şaylan ve ark., 1997).

Literatürde kuraklık, meteorolojik kuraklık, tarımsal kuraklık, hidrolojik kuraklık ve sosyo-ekonomik kuraklık olmak üzere dört tip kuraklık tanımlanmaktadır. Kuraklık, meteorolojik kuraklık olarak başlar ve bunu sırasıyla tarımsal kuraklık ve hidrolojik kuraklık takip eder. Meteorolojik kuraklık, bölgenin normale göre daha az yağış alma durumudur (Anisfeld, 2010).

Günümüze kadar kuraklığı takip edebilmek için birçok kuraklık indisi geliştirilmiştir. Yalnızca yağış verilerine ihtiyaç duyması nedeniyle standart yağış indisi (SYİ), hesaplamasının kolay ve güvenli olması nedeniyle tüm dünyada en çok kullanılan kuraklık indisidir (Doğan ve ark., 2012). Yağış indisleri üzerine geçmişte pek çok çalışma yapılmıştır (Keskin ve ark. 2007; Patel ve ark., 2007; Topçuoğlu ve ark. 2008). Bonaccorso ve ark. (2003) Sicilya'da SYİ ile farklı periyotlarda kuraklık analizini araştırmışlar ve seçilen periyotların hassasiyeti etkilediğini belirlemişlerdir. Çaldağ ve ark. (2004), SYİ yöntemi ile Türkiye'nin kuzeybatısı için kuraklık analizi yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, SYİ analizine göre Trakya Bölgesinin (İstanbul hariç) 2000 ve 2001 yıllarında şiddetli kuraklık etkisi altında kaldığını belirlemişlerdir. Selçuk (2017) tez çalışmasında, Kızılırmak havzasında SYİ değerlerini kullanarak kuraklık incelemesi yapmıştır. Akın (2019) Tuz gölü havzasında kuraklık araştırmasını De-Martonne ve Erinç indislerini kullanarak yapmış ve Tuz gölünde giderek artan bir kuraklık olduğunu belirlemiştir.

Trend analizi iklim değişimin etkilerini araştırmak için kullanılan en önemli analizlerden biridir. Türkiye'de ve Dünya'da Mann-Kendall testi ile trend analizi için yağış ve sıcaklık verileri üzerine pek çok çalışma yapılmıştır (Kadıoğlu, 1997; Partal ve Kahya, 2006; Westra ve ark., 2013; Gocic ve Trajkovic 2013). Bu çalışmalar

gözlenmiş veriler üzerine trend analizi yapmayı kapsamaktadır. Zhang ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada Standart yağış indeksi ve Aridity indeksinin sınıf aralıklarının üzerine Mann-Kendall yöntemi ile trend analizini uygulamışlardır. Bu çalışmayla Kuru ve yağışlı olarak sınıflandırdıkları ayların sayısının yıllar boyunca değişimini belirlemişlerdir.

Bu çalışmada, Orta Ve Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan illerdeki istasyonlara ait yağış ve sıcaklık verilerinin SYİ ve De Martonne kuraklık indis değerleri hesaplanmış olup bu değerler üzerinden Mann-Kendall yöntemi ile trend analizleri incelenmiştir. Trend analizleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aylık kuraklık indislerinin kuraklık sınıflarına göre sayılarının üzerine trend analizi yapılarak kuraklığın zamanla değişimi belirlenmeye çalışılmıştır.

## Materyal ve Metot

Bu çalışmada yer alan Karadeniz Bölgesi, Türkiye üzerinde 40° - 42° Kuzey paralelleri ile 30° - 42,5° Doğu meridyenleri arasında yer alır. Bu bölgede Karadeniz iklimi etkilidir. Her mevsimde yağış görülür. Yıllık sıcaklık farkları azdır ve yazları serin, kışları ise ılıktır. Türkiye'de en fazla yağış alan Karadeniz Bölgesi'dir.

Karadeniz Bölgesi'nde dağların kıyı kesimindeki nemli havanın iç kısımlara geçmesi engellediği için kıyı kesim ile iç kesim arasında önemli farklar görülür. İç kısımlarda karasallık nedeniyle yazlar sıcak, kışlar soğuk ve kar yağışlıdır. Dağların yükselti ve doğrultusu nedeniyle Orta Karadeniz Bölümü'nde karadeniz ikliminin yayılma alanı diğer bölümlere göre daha geniştir. Bunun nedeni Orta Karadeniz Bölümü'nde dağlar iç kısımlardan başlamıştır. Bu nedenle Orta Karadeniz Bölümü'nde yağış miktarında azalma görülür. Doğu Karadeniz Bölümü'ne doğru yağış miktarlarında artış görülür. Karadeniz Bölgesi haritası ve kullanılan istasyonların dağılımı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Seçilen İstasyonlar

Tablo 1. İstasyonlara ait bazı bilgiler

İstasyon Adı	İstasyon No	Veri Aralığı	Aylık Ortalama Sıcaklık (°C)	Yıllık Toplam Yağışların Ortalaması (mm)	Enlem – Boylam
Amasya	17085	1961 – 2015	13.7	459.54	40°40' K – 35°50' D
Artvin	17045	1960 – 2015	12.2	710.10	41°10' K – 41°49' D
Bayburt	17089	1960 – 2015	7.0	438.21	40°15' K – 40°13' D
Çorum	17084	1960 – 2015	10.7	442.00	40°32' K – 34°56' D
Giresun	17034	1960 – 2015	14.6	1259.60	40°55' K – 38°23' D
Gümüşhane	17088	1965 – 2015	9.7	461.38	40°27' K – 39°27' D
Ordu	17033	1963 – 2015	14.3	1032.00	40°59' K – 37°53' D
Rize	17040	1960 – 2015	14.3	2236.88	41°02' K – 40°30' D
Samsun	17030	1960 – 2015	14.5	706.39	41°20' K – 36°15' D
Sinop	17026	1960 – 2015	14.2	686.32	42°01' K – 35°09' D
Tokat	17086	1961 – 2015	12.5	432.39	40°19' K – 36°33' D
Trabzon	17037	1960 – 2005	14.6	807.22	40°59' K – 39°45' D

### Standart Yağış İndisi

Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SYİ) yöntemi ilk olarak Mckee ve ark. (1993) tarafından ortaya atılmıştır. SYİ esas olarak belirlenen zaman dilimi içinde yağışın ortalamadan olan farkının standart sapmaya bölünmesi ile hesaplanır.

$$SYİ = (X_i - X_{ort}) / \sigma \quad (1)$$

Burada  $X_i$ ; aylık yağış miktarı,  $X_{ort}$ ; uzun süreli aylık yağışların ortalaması,  $\sigma$  ise yağış miktarlarının standart sapmasıdır.

Genellikle yağış serileri normal dağılıma uymazlar. Bunun için SYİ değerlerinin normal dağılıma dönüştürülmesi gerekir. Bu amaçla yağış zaman serilerine çok iyi uyduğu kabul edilen Gamma dağılımı kullanılır. Bunu yapmak için aylık yağış frekansı dağılımına Gamma olasılık yoğunluk fonksiyonu uydurulur. Gamma fonksiyonu aşağıdaki eşitlikle hesaplanır (Kıymaz ve ark., 2011)

$$g(x) = 1/(\beta^\alpha \Gamma(\alpha)) x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad x \geq 0 \quad (2)$$

Burada  $\alpha > 0$  şekil parametresi,  $\beta > 0$  ölçek parametresi,  $\Gamma(\alpha)$  Gama fonksiyonudur. Yine  $\alpha$

ve  $\beta$ 'nin tahmininde maksimum olasılık çözümlerini kullanılır.

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (5)$$

Burada,  $n$ : yağış gözlemlerinin sayısıdır. Gözlenmiş zaman serileri kullanılarak elde edilen bu parametreler daha sonra herhangi bir ayda gözlenmiş bir değer toplam olasılık yoğunluk fonksiyonunu bulmak için kullanılır. Bu durumda toplam olasılık dağılım fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (6)$$

Gama fonksiyonu  $x=0$  için tanımsızdır ve yağış dağılımı sıfır (0) değerler içerebilir; bu durumda

toplam olasılık dağılımı aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$H(x)=q+(1-q)G(x) \quad (7)$$

Bu eşitlikte q sıfır değeri için olasılığı ifade eder. Eğer m herhangi bir yağış serisindeki sıfır (0) değerleri ifade etmek için kullanılırsa,  $q=m/n$  olarak tanımlanabilir. Toplam olasılık değeri H(x), ortalaması sıfır (0) ve bir (1) varyans değeri taşıyan, SYİ değerini ifade eden standart normal rastgele değerli Z değişkenine dönüştürülür. H(x), SYİ'nin değeridir (Kömüşçü ve ark., 2002). SYİ yöntemine göre yapılan sınıflandırma Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. SYİ sınıflandırması

SYİ Değerleri	Sınıflandırma
2,0 ve üstü	Çok Şiddetli Nemli
1,50 – 1,99 arası	Şiddetli Nemli
1,00 – 1,49 arası	Orta Şiddetli Nemli
-0,99 – 0,99 arası	Normal
-1,00 – -1,49 arası	Orta Şiddetli Kurak
-1,50 – -1,99 arası	Şiddetli Kurak
-2,00 ve altı	Çok Şiddetli Kurak

Standart Yağış İndisi esas itibariyle kurak ve nemli sınıf aralıklarına göre farklı zaman ölçeklerindeki yağışların hangi sınıfa girdiğini belirlemek amacıyla uygulanan bir yöntemdir. Böylece SYİ değerleri ile yapılan bir kuraklık değerlendirmesinde indeksin arka arkaya negatif olduğu periyod kurak dönem olarak tanımlanır (McKee ve ark. 1993). Bu çalışmada ise 1 aylık SYİ değerlerinin zamansal değişimleri araştırılmıştır.

### De Martonne Kuraklık İndisi

De Martonne indisi Yıllık Ortalama Sıcaklık ve Yıllık Toplam Yağış değerleri esas alınarak hesaplanır. Bu formülle yapılan hesaplama sonucu Yıllık Kuraklık İndisi (IDM) değerleri elde edilir (deMartonne, 1926).

$$I_{DM} = \frac{P}{T+10} \quad (8)$$

Burada IDM; yıllık De-Martonne kuraklık indisi, P; yıllık toplam yağış (mm) ve T; yıllık ortalama

sıcaklıktır. De Martonne aylık kuraklık indisi değeri ise aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$I_M = \frac{12P'}{T'+10} \quad (9)$$

Burada  $I_M$ ; aylık kuraklık indisi,  $P'$ ; aylık toplam yağış (mm),  $T'$ ; aylık ortalama sıcaklıktır. Bu formüllerde T ve  $T'$  değerlerine eklenen +10 değeri, bazı yerlerdeki negatif sıcaklık değerini pozitif yapmak için kullanılan bir katsayıdır.

Buna göre hesaplanan De-Martonne indisi değerleri için aşağıdaki sınıflandırma kullanılabilir.

Tablo 3. De Martonne İndisinin sınıflandırılması

$I_{DM}$	Sınıf aralığı
$I_{DM} < 5$	Çok Kurak
$5 \leq I_{DM} < 10$	Yarı Kurak
$10 \leq I_{DM} < 20$	Kurak
$20 \leq I_{DM} < 30$	Yarı Nemli
$30 \leq I_{DM} < 60$	Nemli
$60 \leq I_{DM}$	Çok Nemli

### De Martonne – Gottmann İndisi

De Martonne indisinin, Gottmann ile birlikte ilk haline bazı eklemeler ve değişiklikler yapılması ile elde edilmiştir (Akın, 2019). Buna göre aşağıda verilen denklem elde edilmiştir.

$$I_{DMG} = \frac{1}{2} \left( \frac{P}{T+10} + \frac{12P_d}{T_d} \right) \quad (10)$$

Burada  $I_{DMG}$ ; De Martonne–Gottman indisi değeri,  $P_d$ ; en kurak ayın yağışı,  $T_d$ ; en kurak ayın ortalama sıcaklığıdır.

Bu denkleme göre yıllık yağış toplamı ve yıllık ortalama sıcaklık değerlerinin dışında en kurak ayın yağış ve sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Sınıflandırma yukarıda yer alan Tablo 3'e göre yapılır.

### Mann-Kendall testi

Mann-Kendall testi hidrometeorolojik zaman serilerinin eğilimlerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan parametrik olmayan bir testtir. Bu testte çeşitli zaman serilerinde var olabilecek pozitif veya negatif yöndeki gidişlerin istatistiksel olarak önemini belirtir.

Parametrik olmayan testler değişkenlerin dağılımından etkilenmediği için verilerin değerlerinden ziyade birbirlerine göre küçüklük – büyüklük durumları önemlidir. Veri setindeki her bir değer kendinden önceki değerlerin farkı alınır. Alınan bu değerlere işaret fonksiyonu uygulanır ve elde edilen -1 ve +1'lerin toplamıyla S değeri elde edilir.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (11)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1; & (x_j - x_k) > 0 \text{ ise} \\ 0; & (x_j - x_k) = 0 \text{ ise} \\ -1; & (x_j - x_k) < 0 \text{ ise} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{Var}(S) = (n(n-1)(2n+5))/18 \quad (13)$$

S'in varyansı yukarıdaki denklem ile hesaplanır. Eğer veriler içerisinde benzer gözlemlerin olması durumunda t eşit olan gözlemlerin sayısını göstermek üzere S'nin varyansı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (14)$$

$n > 10$  için varyansı belirlenen Mann-Kendall testinin önemli olup olmadığı z standart değişkeni ile belirlenir.

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}; & S > 0 \\ 0; & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}; & S < 0 \end{cases} \quad (15)$$

Seçilen bir  $\alpha$  anlamlılık seviyesinde z kritik değeri belirlenir. Bu çalışmada  $\alpha=0,05$  olarak seçilmiştir. Standart Normal Dağılım tablosuna göre  $z_{(\alpha/2)}$  değeri 1,96 olarak okunmuştur. Mann-Kendall testine göre elde edilen z değeri [-1,96;1,96] aralığında ise istatistiksel olarak anlamlı bir trend yoktur denir. Aksi halde z nin

değerine göre azalan veya artan bir trend olduğu söylenir (Mondal ve ark., 2012).

## Bulgular

### Yağış verilerinin trend analizi

Çalışmada, ilk önce gözlenmiş yağış verilerinin trend analizi yapılmıştır. Tüm istasyonlara ait aylık toplam ve yıllık toplam yağış verilerinin trend analiz sonuçları Tablo 4'de gösterilmiştir. Sonuçlara göre yıllık olarak bakıldığında tüm istasyonlar artış eğilimi göstermiş olmakla birlikte 6 istasyonda (Artvin, Bayburt, Giresun, Ordu, Sinop ve Tokat) istatistiksel önemli ( $|z| > z_{(\alpha/2)}$ ) artış trendi belirlenmiştir. Aylık olarak bakıldığında ise özellikle Mart, Eylül ve Ekim aylarında önemli artış eğilimleri vardır. Ekim ayında 5 istasyonda istatistiksel artış trendi bulunmuştur.

### Standart yağış indisi üzerine trend analizi

Kuraklık indisleri için 12 istasyondan alınan yağış değerleri kullanılmıştır. Hesaplama için SPIGenerator isimli program kullanılmıştır. Samsun istasyonu için yağış verilerine Gama Dağılımı yöntemi uygulanarak elde edilen 1 aylık SYİ değerleri bulunmuş olup Şekil 2'de gösterilmiştir.

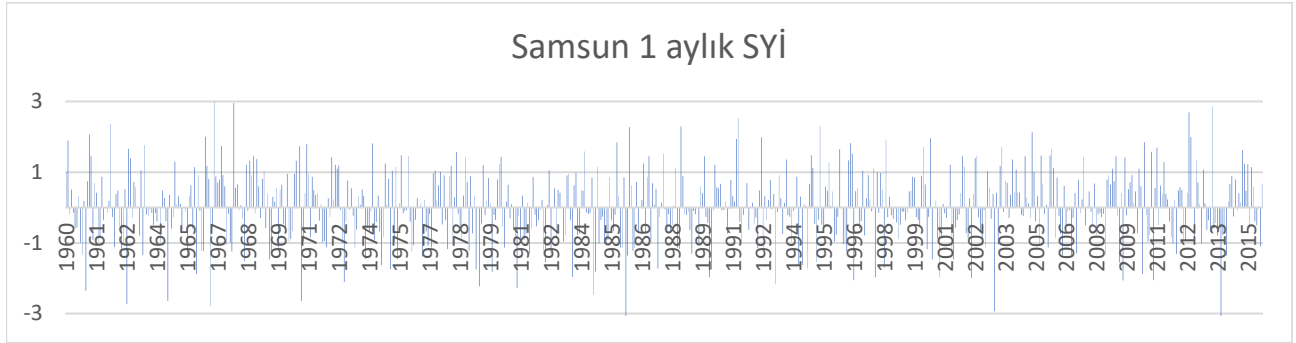
Tablo 5 de ise 1 aylık SYİ değerlerinin sınıflandırma aralıklarına göre, o yıla ait hesaplanan sınıf aralığına düşen örnek sayısının üzerine Mann-Kendall trend analizi uygulanmıştır. Örnek vermek gerekirse Çok şiddetli kuraklık sınıfı için (-2 ve altı) aylık indis değerlerinin yıl içindeki sayılarının 1960'tan 2015'e değişimi incelendiğinde Ordu ilinde z değeri 2,04 yani istatistiksel önemli artış olarak bulunmuştur. Buna karşın Şiddetli ve Orta şiddetli kuraklıklarda Bayburt ve Trabzon illerinde istatistiksel önemli azalış trendi vardır. Yine Trabzon ve Artvin'de Çok Şiddetli Nemlilik sınıfındaki SYİ değerlerinin sayısında yıllar içerisinde artış trendi olduğu bulunmuştur. Genel olarak bakıldığında Nemlilik sınıfları için tüm istasyonlarda artış eğilimi görülmektedir. Kuraklık sınıfları içinse genel olarak belirli bir eğilim görülmemiştir.

Tablo 4. Gözlenmiş yağışların Mann-Kendall test sonuçları

İstasyon Adı	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Amasya	-0.94	0.00	0.55	-0.51	1.53	1.34	0.51	0.83	0.52	1.27	0.84	-1.66	1.39
Artvin	0.57	0.09	1.53	-0.20	0.53	-0.06	1.51	1.60	-0.01	1.84	0.49	-0.92	<b>2.25</b>
Bayburt	1.05	1.86	0.99	<b>2.08</b>	0.80	-1.87	1.76	0.93	0.83	1.91	-0.23	-0.71	<b>2.66</b>
Çorum	-0.08	-1.04	0.20	-0.71	-0.23	0.61	-0.49	-0.14	0.86	1.03	0.36	-1.51	0.40
Giresun	-0.01	0.09	0.76	-0.80	0.59	1.13	0.11	-0.61	0.93	<b>2.08</b>	1.43	-0.34	<b>3.29</b>
Gümüşhane	0.79	1.83	1.01	0.48	-0.08	-0.63	1.33	0.02	1.65	1.31	0.67	<b>-2.48</b>	1.18
Ordu	0.82	0.77	<b>2.11</b>	0.41	0.83	0.23	-1.08	-0.56	1.04	1.26	1.00	-0.99	<b>2.03</b>
Rize	-0.78	-0.02	0.21	-0.83	-0.65	1.27	0.81	-0.19	<b>1.97</b>	<b>1.96</b>	0.35	0.43	1.77
Samsun	0.11	-0.10	0.57	-1.03	-0.27	0.89	1.34	0.61	-0.37	0.33	0.29	0.17	1.32
Sinop	-0.14	0.44	<b>2.42</b>	-0.49	-1.24	1.05	1.48	-0.85	0.19	<b>2.17</b>	0.44	0.89	<b>2.18</b>
Tokat	0.12	1.12	1.51	-0.07	0.53	0.28	0.28	1.70	-0.32	<b>2.68</b>	0.99	<b>-2.00</b>	<b>2.08</b>
Trabzon	0.55	1.24	1.18	0.72	0.41	0.03	0.34	1.16	0.20	<b>2.12</b>	1.14	0.11	1.04

Tablo 5. 1 aylık SYİ için trend analizi

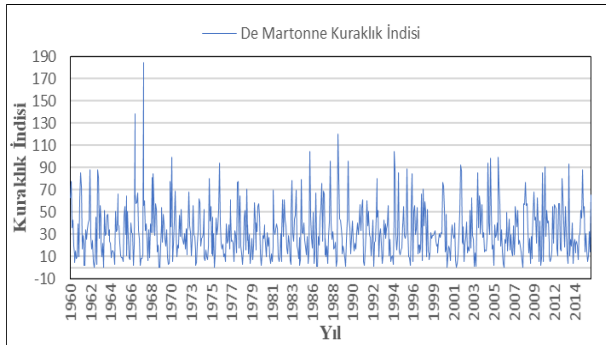
İstasyon Adı	Çok Şiddetli Kuraklık	Şiddetli Kuraklık	Orta Şiddetli Kuraklık	Orta Şiddetli Nemlilik	Şiddetli Nemlilik	Çok Şiddetli Nemlilik
Amasya	-0,58	-1,39	-1,51	1,44	0,39	1,61
Artvin	0,13	0,98	-1,89	1,73	-0,72	<b>2,17</b>
Bayburt	-0,11	<b>-2,71</b>	<b>-2,07</b>	<b>2,00</b>	0,27	1,33
Çorum	0,17	1,06	0,29	-0,49	0,84	1,65
Giresun	-0,71	0,37	-0,73	0,75	-0,26	0,79
Gümüşhane	-0,41	-0,56	0,27	1,66	0,66	0,04
Ordu	<b>2,04</b>	-1,19	-1,75	0,79	-0,61	0,59
Rize	0,93	0,87	-0,41	1,92	0,67	-0,27
Samsun	-0,62	0,14	-0,39	0,51	0,05	-0,14
Sinop	0,50	-0,19	0,38	0,94	0,67	0,59
Tokat	-0,46	-1,40	-0,46	1,34	-0,36	1,13
Trabzon	0,16	-0,94	<b>-1,97</b>	0,98	0,09	<b>2,19</b>



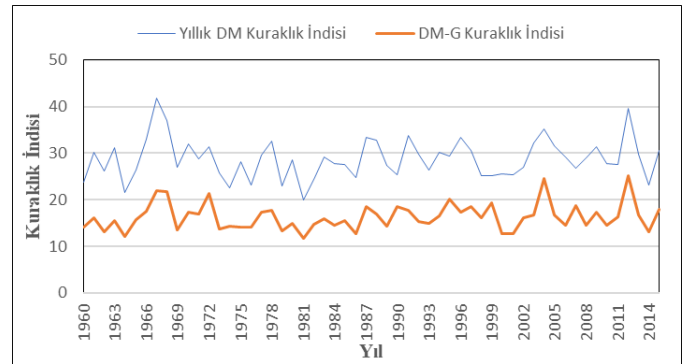
Şekil 2. Samsun 1 aylık SYİ değerleri

### De Martonne kuraklık indisinin trend analizi

Tüm istasyonlar için sıcaklık ve yağış verileri ile aylık olarak De Martonne (DM) kuraklık indis değerleri, yıllık olarak De Martonne Kuraklık indis değerleri ve De Martonne – Gottman (DM-G) kuraklık indis değerleri hesaplanmıştır. 17030 numaralı Samsun istasyonundan alınan verilerle hesaplanan aylık De Martonne kuraklık indisleri Şekil 3'te, yıllık De Martonne kuraklık indis değerleri ile De Martonne – Gottman kuraklık indis değerlerinin gidişi ise Şekil 4'te gösterilmektedir. Aylık DM indis değerlerinin 1966-1968 yılları arasında oldukça yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. DM indis sınıflandırmasında 20'den küçük olması genellikle o aylar için kuraklığın söz konusu olduğu ve sulama ihtiyacının olduğu anlamında kabul edilmiştir.



Şekil 3. Aylık DM indis değerleri (Samsun)



Şekil 4. Yıllık DM ve DM-G indis değerleri (Samsun)

Yıllık DM ve DM-G indislerinin karşılaştırılmasında ise DM-G indisinin daha düşük değerler verdiği görülmektedir. Bunun nedeni DM-G indis hesaplamasında en kurak aylarında hesaplamaya dahil edilmesidir. Yıllık DM indis değerlerine bakıldığında tüm değerlerin 20'nin üzerinde olduğu görülmektedir. Ancak DM-G indis değerleri 10 ile 30 arasında değişmektedir.

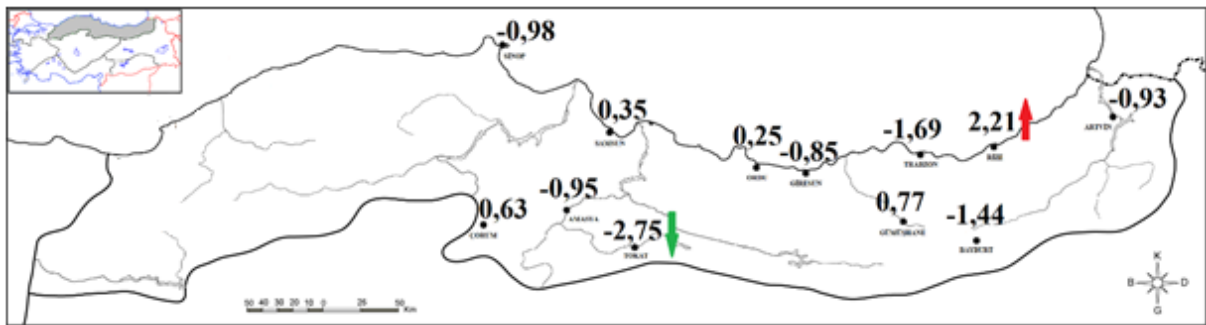
Çalışmanın sonraki aşamasında bu elde edilen aylık DM indis değerleri üzerine Mann-Kendall testi yapılmıştır. Tablo 6'da aylık hesaplanan DM indis değerlerinin ve yıllık hesaplanan DM ve DM-G indis değerlerinin üzerine uygulanan Mann-Kendall test sonuçlarını göstermektedir. Aylıklarda özellikle Ekim ayında genel olarak tüm istasyonlarda artış eğiliminde olduğu ve bazı istasyonlarda istatistik olarak önemli artış trendleri (Sinop, Tokat ve Trabzon) olduğu bulunmuştur. Yıllık olarak bakıldığında ise 12 istasyonun 11 tanesi artış eğilimi ve 2 tanesi

(Giresun, Trabzon) istatistik önemli artış trendi göstermiştir. DM-G indisi sonuçları ile DM indisi sonuçları arasında bazı istasyonlarda farklılıklar olsa da genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. DM kuraklık indisi değerlerinin sınıflandırılmasında  $DM < 20$  değeri baz alınarak yıl içindeki kurak dönem gösteren ayların sayısı belirlenmiştir. Uzun dönem yıllar içerisinde görülen bu kurak ayların sayılarının trend analizi

yapıldığında hesaplanan z değerleri Şekil 5'te harita üzerinde gösterilmiştir. Şekil 5'e göre Rize istasyonu için kurak dönemlerin sayısında artış trendi olması ilginçtir. Tokat istasyonu içinse azalış trendi bulunmuştur ( $z = -2,75$ ). Yine Trabzon istasyonu için de  $\alpha = 0,05$  önem seviyesinde önemli olmasa da ciddi bir azalma eğilimi bulunmuştur ( $z = -1,69$ ). Artvin ve Bayburt istasyonları için de azalma eğilimi görülmektedir.

Tablo 6. Aylık ve Yıllık DM ve DM-G indisleri üzerine trend analizi

İstasyon Adı	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık DM	Yıllık DM-G
Amasya	-0,99	-0,23	0,60	-0,52	1,25	1,13	0,38	0,72	0,47	0,96	0,87	-1,52	1,17	1,33
Artvin	0,38	0,02	1,43	-0,04	0,46	-0,22	1,29	1,31	-0,09	1,31	0,67	-0,81	1,80	1,56
Bayburt	-0,81	1,56	-0,20	1,61	1,00	-1,92	1,72	0,77	0,81	1,55	-0,10	0,16	1,40	<b>2,08</b>
Çorum	-0,16	-1,70	0,30	-0,85	-0,18	0,47	-0,59	-0,24	0,73	1,00	0,49	-1,31	0,17	0,02
Giresun	-0,35	-0,12	0,64	-0,80	0,46	0,97	-0,16	-0,83	0,64	1,84	1,42	-0,15	<b>2,23</b>	0,95
Gümüşhane	-1,25	0,24	0,17	-0,34	-0,74	-1,43	0,29	-0,75	0,58	-0,09	-0,02	<b>-2,91</b>	-0,45	0,15
Ordu	0,59	0,62	1,63	0,23	0,58	-0,02	-1,33	-0,76	0,77	0,93	0,76	-0,88	0,71	-0,54
Rize	-0,84	-0,19	0,01	-0,88	-0,93	1,11	0,30	-0,52	1,59	1,43	0,32	0,57	0,47	-1,92
Samsun	-0,22	-0,18	0,49	-0,88	-0,28	0,64	1,30	0,50	-0,52	0,10	0,59	-0,18	0,80	1,43
Sinop	-0,26	0,33	<b>2,11</b>	-0,30	-1,29	0,96	1,31	-0,98	0,16	<b>1,99</b>	0,66	0,86	1,21	1,26
Tokat	-0,38	0,86	1,33	-0,16	0,41	0,04	0,22	1,51	-0,50	<b>2,39</b>	1,19	-1,60	1,69	1,71
Trabzon	0,53	1,29	1,27	0,64	0,36	-0,08	0,16	1,17	0,28	<b>2,05</b>	1,29	0,45	<b>3,35</b>	<b>2,09</b>



Şekil 5. Aylık DM indisine göre kurak ayların ( $IDM < 20$ ) sayılarının trend analizi

## Sonuçlar

Bu çalışmada Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan 12 istasyondan alınan yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak SYİ ve De Martonne kuraklık indisleri hesaplanmış ve Mann-Kendall yöntemi ile trend analizi yapılmıştır. Gözlenmiş veriler üzerine yapılan trend analizine, yıllık toplam yağış verileri tüm istasyonlarda artış eğilimi göstermiş ve 6 istasyonda istatistik olarak önemli artan trend olduğu belirlenmiştir. Aylık olarak bakıldığında ise özellikle Mart, Eylül ve Ekim aylarında önemli artış trendleri olduğu görülmüştür.

1 aylık SYİ değerlerinin sınıflandırma aralıklarına göre yıl içindeki sayılarının 1960'tan 2015'e kadar değişimi incelendiğinde Nemlilik sınıflarında genel olarak tüm istasyonlarda artış eğilimi ve 2 istasyonda (Trabzon ve Artvin) Çok Şiddetli Nemlilik sınıfında istatistik önemli artış trendi olduğu görülmektedir. DM ve DM-G indislerinin trendleri incelendiğinde ise yıllıkta ve özellikle Ekim ayında tüm istasyonlarda artış eğilimi görülmektedir. Yıllık olarak bakıldığında 2 istasyonda (Giresun, Trabzon) istatistik önemli artış trendi vardır. Bu sonuç yağış verilerinin trendleri ve 1 aylık SYİ verilerin kuraklık sınıflarının trendler ile uyumludur. Aylık DM indislerinin, IDM<20 değerleri baz alınarak hesaplanan kurak ayların sayısında ise genellikle karışık bir durum vardır. Bazı istasyonlarda artış bazılarında ise azalış eğimi görülmüştür. Örneğin Rize istasyonu için 0,05 anlamlılık seviyesinde önemli artan trend bulunmuştur. Bu sonuçlara göre Orta ve Doğu Karadeniz bölgesi için genel olarak yağışlarda artış ve kuraklıkta azalış olduğu görülmekle beraber Rize, Samsun ve Çorum gibi bazı istasyonlarda kurak ayların sayısında artış eğilimi olması dikkat çekicidir.

Bu çalışma bize sadece gözlenmiş yağış verileri değil kuraklık indis değerleri üzerine de trend analizi yapılması halinde iklim değişimi açısından farklı bir bakış açısı elde edilebileceğini göstermektedir.

## Kaynaklar

- [1] Akın, B., (2019). Tuz Gölü havzasının kuraklık analizi. *Ulusal Çevre bilimleri araştırma dergisi*, **2(1)**, 44-56
- [2] Anisfeld, S. C., (2010). *Water Resources*, Island Press, Washington DC, The United States of America, 2010.
- [3] Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., Sutera, A., (2003). Spatial Variability of Drought: An Analysis of the SPI in Sicily, *Water Resources Management*, **17**, 273-296.
- [4] Çaldağ, B., Şaylan, L., Toros, H., Sırdaş, S., Bakanoğulları, F., (2004). Drought Analysis in Northwest Turkey, *Role of Multipurpose Agriculture in Sustaining Global Environment*, 169-179.
- [5] de Martonne, E., (1926). Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité, *La Météorologie* **2**:449-458
- [6] Doğan, S., Berktaş, A., Singh, V.P., (2012). Comparison of Multi-monthly Rainfall Based Drought Severity Indices, with Application to Semi-arid Konya Closed Basin, Turkey, *Journal of Hydrology*, **470-471**, 255-268.
- [7] Gocic, M., Trajkovic S., (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, **100**, 172-182.
- [8] Kadioğlu, M., (1997). Trends in Surface Air Temperature Data Over Turkey, *International Journal of Climatology* **17**, 511-520
- [9] Keskin, M.E., Terzi, Ö., Taylan, E.D., Yılmaz, A.G., (2007). Isparta Bölgesi Meteorolojik Kuraklık Analizi, I. Türkiye İklim Değişikliği Kongresi-TİKDEK, 350-359, İstanbul, Türkiye.
- [10] Kıymaz, S., Güneş, V., Asar, M., (2011). Standartlaştırılmış Yağış İndeksi İle Seyfe Gölünün Kurak Dönemlerinin Belirlenmesi. *GOÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, **28(1)**, 91-102
- [11] Kömüşçü, A.Ü., Erkan, A., Turgu, E., (2002). Normalleştirilmiş Yağış İndeksi Metodu (SPI) İle Türkiye'de Kuraklık Oluşum Oranlarının Bölgesel Dağılımı. *3.Atmosfer Bilimleri Sempozyumu*, 19-21 Mart, 268-275.
- [12] McKee, T.B., Doesken N.J., Kleist J., (1993). The relationship of drought frequency and duration to time steps, *Preprints, 8th Conference on Applied Climatology*, January 17-22 Anaheim, California, 179-184.
- [13] Mondal, A., Kundu, S., Mukhopadhyay, A., (2012). Rainfall trend analysis by Mann Kendall test: A case study of NorthEastern part of Cuttack District, Orissa, *International Journal of Geology*, **2**, 70-78.
- [14] Partal, T., Kahya, E., (2006). Trend analysis in Turkish precipitation data, *Hydrological*



*Processes*, **20**, 2011-2026.

- [15] Petel, N.R., Chopra, P., Dadhwal, V.K. (2007). Analyzing Spatial Patterns of Meteorological Drought Using Standardized Precipitation Index, *Meteorological Applications*, 14, 329-336.
- [16] Selçuk, D., (2017). Kızılırmak havzasında hidrometeorolojik parametrelerle kuraklık analizi ve tahmini, Yüksek Lisans tezi. OMÜ Fen bilimleri enstitüsü
- [17] Şaylan, L., Durak, M., Şen, O., (1997). Kuraklık ve Etkileri. *Meteorolojik Karakterli Doğal Afetler Sempozyumu*, Bildiriler Kitabı, 433-444, Ankara.
- [18] Topçuoğlu, K., Mengü, G.P., Anaç, S., (2008). Ege Bölgesi Meteorolojik Kuraklık Analizi, 5. Dünya Su Forumu Türkiye Bölgesel Su Toplantıları-Konya Kapalı Havzası Yeraltısuyu ve Kuraklık Konferansı, 175- 184, Konya, Türkiye.
- [19] Westra, S., Alexander, L.V., Zwiers, F.W., (2013). Global Increasing Trends in Annual Maximum Daily Precipitation. *Journal of Climate*, **26**. 3904-3918
- [20] Zhang Q., Xu C.Y., Zhang Z., (2009). Observed changes of drought/wetness episodes in the Pearl River basin, China, using the standardized precipitation index and aridity index. *Theor Appl Climatol* **98**, 89-99

## Applying trend analysis on drought indices in the Central Black Sea and Eastern Black Sea Region

### Extended Abstract

*Drought is a natural phenomenon, which is caused by the lack of precipitation for a determined time period. There are four type drought in literature. These are meteorological drought, hydrological drought, agricultural drought and socio-economic drought. Firstly, meteorological drought is begins, then hydrological and agricultural drought follows it (Anisfeld, 2010). This study is focused on meteorological drought, which can be explained by the drought indices such as standardized precipitation index, de-Martonne index, aridity index.*

*In this study has been carried out to trend analysis on the drought indices obtained in the Central Black Sea and East Black Sea Region In the present study, the Standardized Precipitation Index (SPI) and de-Martonne index is used to detect drought months. The drought classifications were determined according to values of SPI for every year. The standardized precipitation index and De Martonne index were obtained using the observed monthly precipitation and temperature data. Then, the Mann-Kendall trend test was applied to the drought indexes. Mann-Kendall test was also used for the observed precipitation data. The data network used in this study consists of monthly precipitation data from 12 stations well spread over the Middle and East Black Sea Region and for a period of 55 years from 1960 to 2015.*

*According to the Mann-Kendall trend analysis, all of the stations showed increasing trends in the annual total precipitation. For the monthly observed data, the significant increasing trend was also obtained in especially March, September and October months. For standardized precipitation index, there is generally an increasing tendency in Mild Wet, Very Wet and Extreme Wet classifications. Trabzon and Artvin stations showed statistically significant increasing trend for Extreme Wet classification.*

*Annual DM and DM-G indices showed generally increasing tendency for all the stations. Some significant decreasing trends (in Giresun and Trabzon stations) were also identified in annual De-Martonne indices over the years. Besides, the monthly DM indices showed statistically significant increasing trend in three stations for October month. These results are consistent with the trend results of the observed data and SPI data. However, the trend*

*analysis on the number of drought months according to the DM indices showed some interesting results. There are increasing tendency (positive z value) at the number of drought months in five stations, while there are decreasing tendency (negative z value) at the number of drought months in seven stations.*

*As the results, there is generally an increase in the precipitations and a decrease in the droughts at Center and Eastern Black Sea Region. However, Rize, Samsun and Çorum stations showed an increasing tendency at the number of drought months.*

**Keywords:** *Central and Eastern Black Sea, Standardized Precipitation index, De-Martonne index, Trend Analysis*

## İçinden Akışkan Geçen Boru Doğal Frekansının Genelleştirilmiş Regresyon Yapay Sinir Ağları Yöntemi İle Tahmini

### *Natural Frequency Estimation of Pipe Conveying Fluid by Using Generalized Regression Neural Networks*

Begum Yurdanur Dagli<sup>1\*</sup>, Abdulkerim Ergut<sup>2</sup>, Mustafa Erkan Turan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Manisa, begum.dagli@cbu.edu.tr

<sup>2</sup> Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa, abdulkerim.ergut@cbu.edu.tr

<sup>3</sup> Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa, mustafaerkan.turan@cbu.edu.tr

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*

Geliş: 15 Kasım 2019  
Düzeltilme: 10 Şubat 2020  
Kabul: 10 Mart 2020

*Anahtar kelimeler:*

Akışkan taşıyan boru, dinamik analiz, doğal frekans tahmini, genelleştirilmiş regresyon yapay sinir ağı (GRYSA).

#### ÖZET

Bu çalışmada içinden akışkan geçen silindirik borunun dinamik davranışı farklı mesnet koşulları dikkate alınarak incelenmiştir. Boru Euler-Bernoulli Teorisi kullanılarak modellenmiştir. Dinamik denge altındaki titreşim, ağırlıktan kaynaklanan deplasmanlar ihmal edilerek araştırılmıştır. Boru içerisinden geçen akışkan ideal, kararlı, üniform kabul edilmiştir. Hareket denklemi Hamilton prensibi ile belirlenmiştir. Değişkenler, malzeme ve geometriden bağımsız sonuçlar elde edebilmek için boyutsuzlaştırılmıştır. İlk üç mod için çözümler analitik olarak yapılmıştır. Dönme ve ötelemeye karşı farklı dirençlilik katsayıları ile temsil edilen mesnet koşulları altında doğal titreşim frekansı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler girdi olarak kullanılarak Yapay Sinir Ağları (YSA) ile doğal titreşim frekansı değerleri tahmin edilmiştir. Genelleştirilmiş Regresyon Yapay Sinir Ağ (GRYSA) ileri beslemeli geriye yayılım metodu (İBGY) uygulanmıştır. Sonuçlar seçilen performans kriterleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Model performansının yüksek olması dirençlilik katsayılarına bağlı, akışkan taşıyan boruya ait doğal titreşim frekansının belirlenmesinde GRYSA'nın etkili ve hızlı bir araç olduğunu göstermektedir.

*Doi: 10.24012/dumf.647302*

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 15 December 2019  
Revised: 10 February 2020  
Accepted: 10 March 2020

*Keywords:*

Pipe conveying fluid, dynamic analysis, natural frequency estimation, Generalized Regression Neural Network (GRNN).

#### ABSTRACT

In this study, the dynamic behaviour of cylindrical pipe conveying fluid is investigated by considering different boundary conditions. Pipe is modeled by using Euler-Bernoulli beam theory. Vibration under dynamic equilibrium is examined under by neglecting the deflections caused by gravity. The fluid in the pipe is assumed as ideal, steady and uniform. The equation of motion is obtained with Hamilton's variation principle. Variables are non-dimensionalized to obtain the results which are independent from material and geometry. The solutions of first three modes are achieved with analytical method. The values of natural vibration frequencies are determined under the boundary conditions which are represented by various stiffnesses of translational and rotational springs. The values of natural vibration frequencies are estimated with Artificial Neural Networks (ANN) using the obtained data as input. Generalized Regression Neural Networks (GRNN) is performed with feed forward back-propagation neural networks (FFBP) approaches. The results are compared according to selected performance criteria. The high performance of the model shows that GRNN is an effective and fast method for determining the natural vibration frequency of the pipe conveying fluid due to the stiffness coefficients.

\* Sorumlu yazar / Correspondence  
Begum Yurdanur Dagli  
✉ [begum.dagli@cbu.edu.tr](mailto:begum.dagli@cbu.edu.tr)

## Giriş

Akışkanların iletiminde kullanılan borular, artan enerji talebi ile birlikte günümüzde daha da yaygın hale gelmiştir. Akışkan hareketinden kaynaklı titreşimin stabilite üzerinde etkili olduğu bu sistemlerde dinamik analiz, tasarım ve projelendirme açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle farklı sınır şartlarına ve yükleme koşullarına maruz kalan boru sistemlerinin dinamik davranışına ilişkin birçok kapsamlı çalışma yapılmıştır (Paidoussis ve Issid, 1974; Wiggert ve Tijsseling, 2001; Aldraihem, 2007; Al-Hilli, 2013). Yi-Min vd. (2010) akışkan taşıyan borunun doğal frekansını farklı sınır şartlarını dikkate alarak Galerkin Yöntemi ile belirlemişlerdir. Akışkan hızı ve frekans arasındaki ilişkinin değerlendirdiği çalışmada sonuçlar Coriolis kuvvetinin doğal frekans üzerindeki etkisinin zayıf olduğunu göstermiştir. Zhang vd. (2016) akışkan taşıyan borunun lineer ve nonlineer titreşimini geliştirdikleri hareket denklemlerini kullanarak incelemişlerdir. Lineer model için viskoz sönümün olmadığı durumda boru deplasmanının sürekli arttığı, nonlineer modelde ise kaotik salınımların, akışkan hızındaki küçük bir artışla bile yeniden ortaya çıktığını vurgulamışlardır. Dağlı ve Sınır (2015) klasik olmayan mesnet koşulları altında araştırma yaparak boru titreşim frekansı üzerinde etkili olan parametreleri ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada içinden akışkan geçen iki ucu mesnetli borunun enine serbest titreşim hareketi incelenmiştir. Dinamik analizde kullanılan boru Euler-Bernoulli Teorisi ile modellenirken, içinden geçen akışkan Euler denklemleri ile temsil edilmiştir. Akışkan-yapı etkileşimi yaklaşımıyla Hamilton prensibi kullanılarak hareket denklemi elde edilmiştir. Sınır şartları, mesnetler için kullanılan  $k_1$ ,  $k_3$  öteleme direngenlik katsayıları ile  $k_2$ ,  $k_4$  dönel direngenlik katsayılarına farklı değerler verilerek belirlenmiştir. Boyutsuzlaştırılan diferansiyel denklem çözümleri ilk üç mod yapısı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Doluluk oranı  $\beta$ , ve akışkan hızı  $u$ , ile değişen doğal frekans  $\omega$  değerleri grafikler halinde sunulmuştur.

Ancak bu hesaplamalar uzun zaman almakta ve zahmetli bir süreç gerektirmektedir. Süreyi kısaltmak ve hesaplamayı kolaylaştırmak amacıyla direngenlik katsayıları ve doğal titreşim frekansına ilişkin sonuçlar girdi olarak kullanılarak Genelleştirilmiş Regresyon Yapay Sinir Ağ (GRYSA) yöntemiyle bir tahmin modeli oluşturulmuştur. Eğitim ve test modellerinin performansı, belirlilik katsayısı ( $R^2$ ), karesel ortalama hata (Root Mean Square Error -RMSE), ortalama mutlak yüzde hata (Mean Absolute Percentage Error-MAPE) ile ölçülmüştür (Cigizoglu ve Kişi, 2005). Tahmin modelinin direngenlik katsayılarına bağlı, akışkan taşıyan boruya ait titreşim frekansının belirlenmesinde etkili olduğu gösterilmiştir.

## Materyal ve yöntem

### Hareketin matematiksel modeli

Çalışmada kullanılan borunun uzunluğu  $L$ , kesit alanı  $A_p$ , birim boy kütlesi  $m$ , olarak kabul edilmiştir. Üniform ve homojen malzemeden üretilen borunun elastisite modülü  $E$ , yoğunluğu  $\rho_p$  ve atalet momenti  $I$  olarak alınmıştır. Sıkıştırılmaz ideal akışkan için ise kütle, hız ve yoğunluk sırası ile  $M$ ,  $u$  ve  $\rho_f$  ile temsil edilmiştir. Enine titreşimin en önemli etkisinin eğilme olduğunu ileri sürerek gerilme ile uzama arasında lineer (Han vd.,1999; Liu vd., 2013) bir ilişki kuran Euler-Bernoulli teorisine göre borunun potansiyel enerjisi

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L E^* I^* \left( \frac{\partial^2 v^*(x^*, t^*)}{\partial x^{*2}} \right)^2 dx^* \quad (1)$$

şekindedir. Burada  $v^*(x^*, t^*)$ ,  $x^*$  konumunda ve  $t^*$  anındaki enine deplasmanı göstermektedir. Boyutlu değişkenler \* sembolü ile belirtilmiştir. Yanal yer değiştirmeye bağlı kinetik enerji

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \rho_p^* A_p^* \left( \frac{\partial v^*(x^*, t^*)}{\partial x^*} \right)^2 dx^* \quad (2)$$

bağıntısı ile verilmiştir. Düzlemsel hareketin modellenmesi için kullanılan Hamilton Prensibi

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} dt \quad (3)$$

olarak gösterilmiştir. Lagrange terimi,  $\mathcal{L} = T - U$  ile ifade edilmektedir. Bu durumda bir bağımlı, iki bağımsız değişken için Euler Bernoulli modeli ile elde edilen hareket denklemi

$$\rho_p^* A_p^* \ddot{v}^* + E^* I^* v^{*IV} = 0 \quad (4)$$

şeklinde yazılır. Diferansiyel denklemde, zamana bağlı türev ( $\dot{\phantom{x}}$ ) ile konuma bağlı türev ise ( $\phantom{x}'$ ) ifadesi ile gösterilmiştir. Borunun içinden geçen akışkan ideal kabul edildiğinden Euler denklemi olarak bilinen sürtünmesiz akışa ait genel bağıntı (Munson vd., 2013).

$$\frac{\partial P}{\partial y^*} = \rho_f Y - \rho_f a_y \quad (5)$$

olarak elde edilir. Burada  $y$  düşey doğrultu olmak üzere,  $a_y$ , akışkan ivmesinin düşey bileşenini temsil etmektedir.  $P$  ve  $Y$  ise sırası ile basınç ve dış kuvveti göstermektedir. Boru ve içinden geçen akışkana ilişkin verilen denklemler akışkan-yapı etkileşimi yaklaşımı ile birleştirilerek sistemin hareketi Denklem (6) ile tanımlanır.

$$\rho_p A_p \ddot{v}^* + \rho_f A_f \left( \ddot{v}^* + 2u^* \dot{v}^{*'} + u^{*2} v^{*''} \right) + EI v^{*IV} = 0 \quad (6)$$

Hareket denklemini malzemedan bağımsız hale getirmek için kullanılan boyutsuz deplasman  $v$ , konum  $x$ , zaman  $t$  ve akışkan hızı  $u$  aşağıda verilmiştir.

$$v = \frac{v^*}{L}, \quad x = \frac{x^*}{L} \\ t = t^* \sqrt{\frac{EI}{L^4(m+M)}}, \quad u = u^* \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{EI}} L \quad (7)$$

Boyutsuz ifadelerin Denklem (6)'da yazılması ile elde edilen akışkan taşıyan boruya ilişkin hareket denklemi

$$v^{IV} + u^2 v'' + 2\sqrt{\beta} u v' + \ddot{v} = 0 \quad (8)$$

şeklinde dir. Boyutsuzlaştırma ile elde edilen  $\beta$ , doluluk oranı olarak adlandırılır ve akışkan kütle sinin toplam kütle ye oranı  $M/(m+M)$  olarak ifade edilir (Paidoussis, 1974).

### Analitik çözüm yöntemi

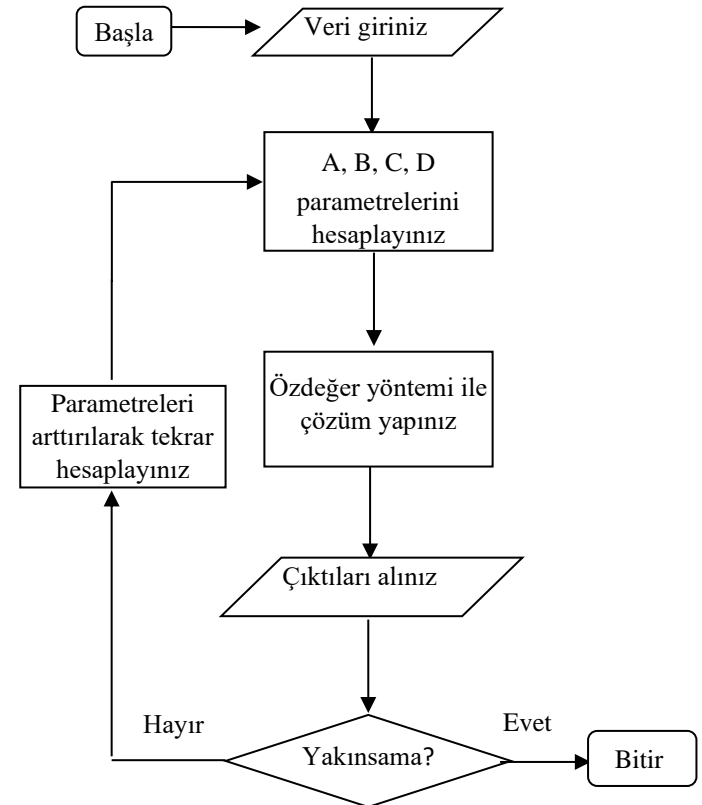
Matematiksel modeli oluşturulan (Euler-Bernoulli) akışkan taşıyan boruya ait lineer diferansiyel hareket denklemi için genel çözüm

$$v(x, t) = X_n(x) e^{i\omega_n t} + \bar{X}_n(x) e^{-i\omega_n t} \quad (9)$$

şeklinde dir. Burada  $X_n$ , Coriolis terimine bağlı kompleks fonksiyonu temsil etmektedir. Doğal titreşim frekansı ise  $\omega_n$ , ile gösterilmiştir. Denklem (9), Denklem (6) da yerine yazıldığında Denklem (10) elde edilir.

$$X^{IV} + u^2 X'' + 2\sqrt{\beta} u i \omega X' - \omega^2 X = 0 \quad (10)$$

Denklemin çözümü için Şekil 1'de akış diyagramı verilen yazılımdan yararlanılmıştır (Dagli ve Ergut, 2019).



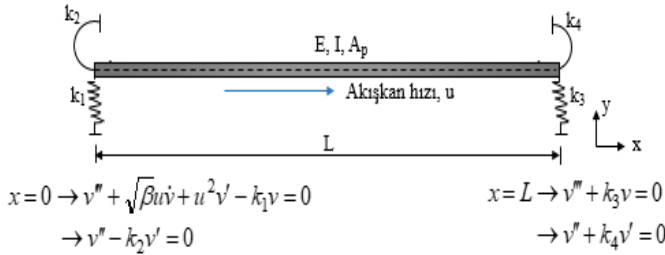
Şekil 1. Akış diyagramı

Figure 1. Flow chart

Akış diyagramında hesaplanması istenen A, B, C, D parametreleri

$$A = -\omega_n^2, \quad B = 2\sqrt{\beta u i \omega_n}, \quad C = u^2, \quad D = 1 \quad (11)$$

olarak verilmiştir. Sınır şartları, mesnetler için kullanılan  $k_1$ ,  $k_3$  öteleme direngenlik katsayıları ve  $k_2$ ,  $k_4$  dönme direngenlik katsayıları dikkate alınarak Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Akışkan taşıyan boru sınır şartları

Figure 2. Boundary conditions of pipe conveying fluid

Borunun başında ve sonunda sınır şartlarının farklı olması  $x=L$  noktasında akışkanın serbest kalmasından kaynaklanmaktadır (Aldraihem, 2007).

Boyutsuz direngenlik katsayıları

$$k_1 = k_1^* \frac{L^3}{EI}, \quad k_2 = k_2^* \frac{L}{EI}, \quad k_3 = k_3^* \frac{L^3}{EI}, \quad k_4 = k_4^* \frac{L}{EI} \quad (12)$$

şeklinde verilmiştir. Çalışma kapsamında direngenlik katsayıları borunun iki ucunun da dönme serbestliğinin olduğu basit mesnet, çökme ve dönmeye karşı rijit olan ankastre mesnet koşulları dikkate alınarak, klasik sınır şartları altında değerlendirilmiştir. Ayrıca katsayıları 5,00 ile 1000,00 arasında 16 farklı değer verilerek klasik olmayan elastik mesnet koşulları da incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan veri seti oluşturulmuştur.

### Genelleştirilmiş Regresyon Yapay Sinir Ağı

Specht tarafından 1991 yılında geliştirilen Genelleştirilmiş Regresyon Yapay Sinir Ağları (GRYSA) yönteminde girdi ve çıktı verileri yardımı ile oluşturulan tahmin fonksiyonundan yararlanılmaktadır (Samarasinghe, 2016; Tayfur, 2017). GRYSA, girdi, örüntü, toplama ve çıktı

katmanı olmak üzere dört katmandan meydana gelen bir yapıya sahiptir

Yöntem iteratif eğitim prosedürü gerektirmemektedir. Girdi ve çıktılar arasındaki ilişkiyi tanımlayan fonksiyon doğrudan eğitim verisi yardımı ile belirlenmektedir (Alp & Cigizoglu, 2010). Bağımlı değişken olan  $y$ 'nin bağımsız değişken  $x$ 'e göre regresyonu,  $y$  için en olası değeri vermektedir. En küçük kareler yöntemi ile regresyon tekniği kullanılarak  $y$ 'nin tahmini değerleri elde edilmektedir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu olan  $f(x,y)$ , bilinmiyor ise gözlenen  $X^i$  ve  $Y^i$  arasındaki ilişki kullanılarak tahmin yapılır ve regresyon

$$\hat{Y}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n Y^i \exp\left(-\frac{(X - X^i)^T (X - X^i)}{2s^2}\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(X - X^i)^T (X - X^i)}{2s^2}\right)} \quad (13)$$

şeklinde hesaplanır. Bağıntıda geçen ve belirlenmesi gereken  $s$ , düzeltme parametresini temsil etmektedir.

Tüm veri setindeki çıktılar her bir mod için borunun %10 dolu olmasının durumu göz önüne alınarak hesaplanan doğal frekanslardan oluşmakta olup 129 adet  $\omega_1$ , 129 adet  $\omega_2$  ve 129 adet  $\omega_3$  değerinden meydana gelmektedir. Toplamda 387 adet çıktı değerini elde etmekte kullanılan girdiler ise akışkan hızı  $u$ , öteleme direngenlik katsayıları  $k_1$ ,  $k_3$  ve dönme direngenlik katsayıları  $k_2$ ,  $k_4$  olmak üzere 5 adettir. Tüm verilerin %75'i eğitim veri seti, %25'i test veri setini oluşturmaktadır. Eğitim ve test veri setlerindeki değerler rastgele olarak seçilmiştir.

Çalışmada doğal frekansları tahmin etmek amacıyla farklı çıktı yapısına sahip toplam 4 adet model oluşturulmuştur. Bu modellerin girdi ve çıktı yapıları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. GRYSA modeli girdi ve çıktı yapıları

Table 1. GRNN Model input and output structures

Model No	Girdi Değişkenleri	Çıktı Yapısı
Model 1	u, k <sub>1</sub> ,k <sub>2</sub> ,k <sub>3</sub> ,k <sub>4</sub>	$\omega_1$
Model 2	u, k <sub>1</sub> ,k <sub>2</sub> ,k <sub>3</sub> ,k <sub>4</sub>	$\omega_2$
Model 3	u, k <sub>1</sub> ,k <sub>2</sub> ,k <sub>3</sub> ,k <sub>4</sub>	$\omega_3$
Model 4	u, k <sub>1</sub> ,k <sub>2</sub> ,k <sub>3</sub> ,k <sub>4</sub>	$\omega_1, \omega_2, \omega_3$

Yapısı gereği GRYSA’da sadece düzeltme parametresi  $s$ ’nin belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmada  $s$  parametresi deneme yanılma yöntemi ile değeri tüm modeller için  $0,1$  olarak belirlenmiştir.

Modellerin performansları belirlilik katsayısı ( $R^2$ ), hata karelerinin karekökü ( $RMSE$ ) ve ortalama mutlak yüzde hata ( $MAPE$ ) değerleri kullanılarak belirlenmiştir. Modelin performans ölçütü olarak kullanılan belirlilik katsayısı  $R^2$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (\omega_{(g)}(t) - \bar{\omega}_{(g)}) (\omega_{(h)}(t) - \bar{\omega}_{(h)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\omega_{(g)}(t) - \bar{\omega}_{(g)})^2 (\omega_{(h)}(t) - \bar{\omega}_{(h)})^2}} \right]^2 \quad (14)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Ortalama hata karelerinin karekökü  $RMSE$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\omega_{(g)} - \omega_{(h)})^2} \quad (15)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Ortalama mutlak yüzde hata  $MAPE$

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\omega_{(g)} - \omega_{(h)}}{\omega_{(g)}} \right| \quad (16)$$

şeklinde. Burada  $\omega_{(g)}$ , hesaplanan doğal frekans değerlerini,  $\omega_{(h)}$ , tahmin edilen doğal frekans değerlerini,  $N$ , veri sayısını göstermektedir.

## Bulgular ve değerlendirme

### Doğal frekans analizi sonuçları

Tablo 2’de görülen doğal frekans değerleri klasik mesnet koşulları altında elde edilmiştir. Sabit mesnet, ankastre mesnet sınır şartları ile oluşturulan boru modeline ilişkin direngenlik katsayıları tabloda görülmektedir.

Borunun içinden geçen boyutsuz akışkan hızı  $0,20$ ,  $0,50$  ve  $0,80$  alınarak yapılan araştırmada direngenlik katsayısı arttıkça doğal titreşim frekansı da artmaktadır. En büyük doğal frekans değerleri ankastre-ankastre mesnet koşulları altında elde edilmiştir.

Akışkan hızındaki artış ise doğal frekans değerlerinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle aynı sınır koşulları dikkate alındığında akışkan hızının  $0,80$  olduğu durumda elde edilen sonuçlar en düşük değerlerden oluşmaktadır.

Yaygın olarak kullanılan klasik mesnet koşullarının yanı sıra klasik olmayan; elastik çöken, elastik dönen mesnet koşulları da, farklı direngenlik katsayıları tanımlanarak incelenmiştir.  $10$  farklı direngenlik katsayısı için işlemler tekrarlanmış ve doğal frekansta meydana gelen değişim değerlendirilmiştir. Öncelikli olarak  $k_1$  ve  $k_2$ ’nin farklı değerler aldığı, diğer direngenlik katsayılarının  $1,00$  kabul edildiği koşul ele alınmıştır. Sonuçlar Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 2. Klasik mesnet koşulları altında doğal titreşim frekansı değerleri ( $\beta=0,10$ )

Table 2. The values of natural vibration frequencies under classical boundary conditions ( $\beta=0,10$ )

Koşul	$u$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
Sabit -sabit		$\infty$	0	$\infty$	0	9,8499	39,4580	88,8059
Ankastre-ankastre	0,20	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	22,3629	61,6576	120,8866
Ankastre-sabit		$\infty$	$\infty$	$\infty$	0	15,4038	49,9474	104,2291
Sabit -sabit		$\infty$	0	$\infty$	0	9,7462	39,3509	88,6977
Ankastre-ankastre	0,50	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	22,3082	61,5778	120,7982
Ankastre-sabit		$\infty$	$\infty$	$\infty$	0	15,3276	49,8555	104,1317
Sabit -sabit		$\infty$	0	$\infty$	0	9,3657	38,9656	88,3104
Ankastre-ankastre	0,80	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	22,1117	61,2914	120,4821
Ankastre-sabit		$\infty$	$\infty$	$\infty$	0	15,0522	49,5258	103,7827

Tablo 3. Klasik olmayan mesnet koşulları altında doğal titreşim frekansı değerleri ( $\beta=0,10$ )

Table 3. The values of natural vibration frequencies under non-classical boundary conditions ( $\beta=0,10$ )

$u$	$k_1$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$k_2$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
0,20	5,00	2,4014	25,0225	64,9667	5,00	5,3363	28,1961	69,1384
	10,00	1,8779	24,6743	64,8210	10,00	5,8249	29,4914	71,4258
	20,00	1,6272	24,0189	64,5347	20,00	6,1307	30,0375	73,3550
	30,00	1,5498	23,4231	64,2554	30,00	6,2446	30,8450	74,2022
	40,00	1,5124	22,8892	63,9830	40,00	6,3040	31,0576	74,6770
	50,00	1,4904	22,4159	63,7177	50,00	6,3406	31,1909	74,9803
	250,00	1,4219	19,0917	59,7736	250,00	6,4620	31,6495	76,0568
	500,00	1,4135	18,3968	57,2915	500,00	6,4777	31,7106	76,2039
	750,00	1,4107	18,1556	56,0193	750,00	6,4830	31,7311	76,2536
	1000,00	1,4056	18,0337	55,2711	1000,00	6,4856	31,7414	76,2785
0,50	5,00	2,2736	24,8365	64,8071	5,00	5,1302	28,0381	68,9938
	10,00	1,5676	24,4856	64,6611	10,00	5,6349	29,3418	71,2881
	20,00	1,3557	23,8259	64,3742	20,00	5,9486	30,3083	73,2219
	30,00	1,2899	23,2273	64,0942	30,00	6,0650	30,7019	74,0709
	40,00	1,2579	22,6920	63,8214	40,00	6,1257	30,9152	74,5465
	50,00	1,2390	22,2185	63,5556	50,00	6,1630	31,0490	74,8504
	250,00	1,1799	18,9223	59,2732	250,00	6,2867	31,5092	75,9285
	500,00	1,1727	18,2384	57,1355	500,00	6,3027	31,5704	76,0757
	750,00	1,1703	18,0011	55,8687	750,00	6,3081	31,5910	76,1255
	1000,00	1,1691	17,8812	55,1241	1000,00	6,3108	31,6013	76,1505



Tablo 3. Devam

Table 3. Continuation

$u$	$k_1$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$k_2$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
0,80	5,00	1,1771	24,4870	64,5097	5,00	4,7235	27,7422	68,7246
	10,00	0,8182	24,1310	64,3630	10,00	5,2638	29,0617	71,0317
	20,00	0,6433	23,4633	64,0749	20,00	5,5945	30,4531	72,9743
	30,00	0,5838	22,8594	63,7939	30,00	5,7163	30,4342	73,8265
	40,00	0,5535	22,3215	63,5201	40,00	5,7796	30,6491	74,3037
	50,00	0,5351	21,8477	63,2534	50,00	5,8185	30,7838	74,6085
	250,00	0,4745	18,6044	59,3080	250,00	5,9472	31,2468	75,6896
	500,00	0,4667	17,9409	56,8450	500,00	5,9638	31,3083	75,8372
	750,00	0,4641	17,7110	55,5881	750,00	5,9693	31,3291	75,8870
	1000,00	0,4627	17,5948	54,8502	1000,00	5,9721	31,3394	75,9121

Tablo 3’de verilen koşulların  $k_2$  ve  $k_4$  direngenlik katsayıları açısından değerlendirilmemesi sistemin simetrik olmasından kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi rijitlik arttıkça, doğal frekans değerleri azalmaktadır. İkinci aşamada direngenlik katsayıları ikişerli gruplar halinde değiştirilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

$k_1$ ,  $k_3$  direngenlik katsayısı 50,00, 1000,00 arasında değerler alırken diğer direngenlik katsayıları 1,00 olarak kabul edilmiştir.

Daha sonra  $k_2$ ,  $k_4$ ’e 50,00 ile 1000,00 arasında değer verilerek elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 4’de sunulmuştur.

Tablo 4. Klasik olmayan mesnet koşulları altında doğal titreşim frekansı değerleri ( $\beta=0.10$ )

Table 4. The values of natural vibration frequencies under non-classical boundary conditions ( $\beta=0.10$ )

$u$	$k_1, k_3$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$k_2, k_4$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
0,20	50,00	18,7625	62,2812	122,9653	50,00	9,2557	37,9565	85,6223
	60,00	17,7867	61,7364	122,6630	60,00	9,3177	38,1811	86,0993
	70,00	16,9715	61,2022	122,3632	70,00	9,3627	38,3456	86,4513
	80,00	16,3005	60,6791	122,0658	80,00	9,3968	38,4712	86,7218
	90,00	15,7508	60,1674	121,7708	90,00	9,4235	38,5702	86,9361
	100,00	15,2990	59,6677	121,4783	100,00	9,4451	38,6503	87,1101
	250,00	12,8958	53,6892	117,4013	250,00	9,5638	39,0971	88,0905
	500,00	12,1826	48,6169	111,9232	500,00	9,6043	39,2515	88,4334
	750,00	11,9591	46,3403	107,9023	750,00	9,6179	39,3036	88,5496
	1000,00	11,8501	45,1152	104,9751	1000,00	9,6247	39,3298	88,6081

Tablo 4. Devam

Table 4. Continuation

$u$	$k_1, k_3$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$k_2, k_4$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
0,50	50,00	18,5451	62,1159	122,8188	50,00	9,1487	37,8525	85,5184
	60,00	17,5746	61,5702	122,5162	60,00	9,2115	38,0778	85,9961
	70,00	16,7675	61,0351	122,2161	70,00	9,2569	38,2427	86,3487
	80,00	16,1057	60,5113	121,9185	80,00	9,2914	38,3687	86,6195
	90,00	15,5650	59,9990	121,6232	90,00	9,3185	38,4680	86,8341
	100,00	15,1217	59,4988	121,3305	100,00	9,3403	38,5483	87,0083
	250,00	12,7723	53,5241	117,2516	250,00	9,4603	38,9963	87,9899
	500,00	12,0756	48,4719	111,7749	500,00	9,5012	39,1511	88,3332
	750,00	11,8572	46,2086	107,7583	750,00	9,5150	39,2033	88,4495
	1000,00	11,7506	44,9913	104,8361	1000,00	9,5219	39,2295	88,5081
0,80	50,00	18,1375	61,8078	122,5461	50,00	8,9470	37,6587	85,3253
	60,00	17,1780	61,2603	122,2431	60,00	9,0112	37,8852	85,8043
	70,00	16,3869	60,7237	121,9426	70,00	9,0576	38,0510	86,1577
	80,00	15,7427	60,1985	121,6444	80,00	9,0929	38,1777	86,4292
	90,00	15,2194	59,6851	121,3488	90,00	9,1205	38,2775	86,6443
	100,00	14,7920	59,1840	121,0557	100,00	9,1428	38,3583	86,8189
	250,00	12,5419	53,2168	116,9733	250,00	9,2653	38,8084	87,8028
	500,00	11,8754	48,2022	111,4991	500,00	9,3070	38,9639	88,1468
	750,00	11,6662	45,9637	107,4906	750,00	9,3211	39,0164	88,2634
	1000,00	11,5641	44,7609	104,5777	1000,00	9,3281	39,1764	88,3220

Hesaplanan doğal frekans değerleri incelendiğinde her üç mod için de akışkan hızı arttıkça frekans azalmaktadır. Direngenlik katsayıları artıkça ise rijitlik artmakta ve buna bağlı olarak frekans yine düşmektedir. Ancak direngenliğin 50,00 ve 1000,00 arasındaki değişimi dikkate alındığında 250,00'den sonra direngenlik katsayılarının frekans üzerindeki etkisinin azaldığı görülmektedir. Frekanslar arasındaki rölatif fark % 0,5 ile % 0,009 arasında değerler almakta özellikle 1. mod için yakınsama artmaktadır. Tablo 3'de doğal frekans değerleri arasında elde edilen en büyük fark  $\approx \%30$  olarak,

akışkan hızının 0,80, direngenlik katsayısının 5 ile 10 olduğu koşullar altında hesaplanmıştır.

Direngenlik katsayılarının ikişerli olarak değiştirildiği şartlar değerlendirildiğinde ise en büyük fark direngenlik katsayısının 50,00 ve 60,00 değerlerini aldığı aralıkta,  $\approx \%5$  olarak hesaplanmıştır. Bu koşullarda akışkan hızının değişiminin, doğal frekans değerleri arasında oluşan fark üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek kadar azdır.

Bu da akışkan hızının, direngenlik katsayısının  $k < 50,00$  olması durumunda, doğal titreşim

frekansı üzerinde etkisi olan önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.

### GRYSA Sonuçları

290 adet eğitim verisi kullanılarak GRYSA yöntemi ile oluşturulan tahmin fonksiyonunun belirlenen 4 model için performans değerleri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. GRYSA eğitim aşaması sonuçları

Table 5. GRNN training results

Model	YSA Eğitim Modeli		
	R <sup>2</sup>	RMSE	MAPE
Model 1	1	0,000605428	0,02542662
Model 2	1	0,00037066	0,00094226
Model3	1	0,000325079	0,00035397
Model 4 $\omega_1$	1	0,000622539	0,02573317
Model 4 $\omega_2$	1	0,000366469	0,000968389
Model 4 $\omega_3$	1	0,000334978	0,000354454

Tablo 5’ de bulunan eğitim aşaması sonuçları incelendiğinde tüm modeller için eğitim veri sayısının yeterli büyüklükte olması nedeniyle yüksek  $R^2$  ile düşük  $RMSE$  ve  $MAPE$  değerleri elde edilmiştir. Modellerin tahmin kabiliyetini gösteren değer ise test aşamasında elde edilen değerlerdir.

97 adet test verisi ile tahmin fonksiyonunun performansı değerlendirilmiş ve sonuçlar Tablo 6 ile verilmiştir.

Tablo 6’da verilen test aşaması sonuçlarında Model 1 ile tahmin edilen  $\omega_1$  değerleri için  $R^2$ ’nin bire oldukça yakın,  $RMSE$  değerinin ise küçük olduğu görülmektedir.  $MAPE$  değeri diğer modellere göre büyük olsa da bu  $MAPE$  değeri %10,62 ortalama hata yapıldığını ifade etmektedir. Aynı durum 3 doğal frekans değerinin tek bir model ile tahmin edildiği Model 4 için de geçerlidir. Model 4’ te  $\omega_1$  için  $MAPE$  değeri %13,99 olarak elde edilmiştir.  $\omega_2$  ve  $\omega_3$  değerlerinin tahminleri Model 2, Model 3

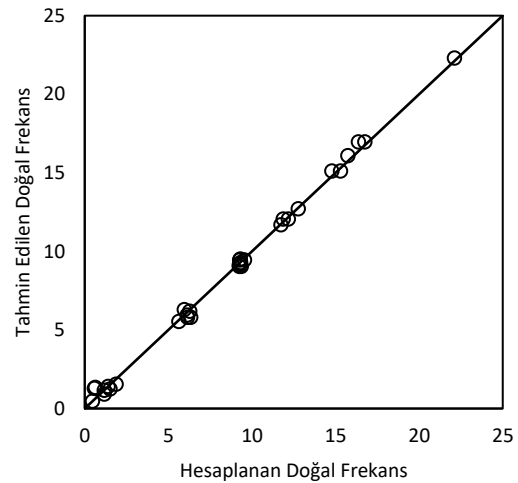
ve Model 4 ile yapılmıştır. Tüm modellerde bire yakın  $R^2$  ile düşük  $RMSE$  ve  $MAPE$  değerleri elde edilmiştir.

Tablo 6. GRYSA test aşaması sonuçları

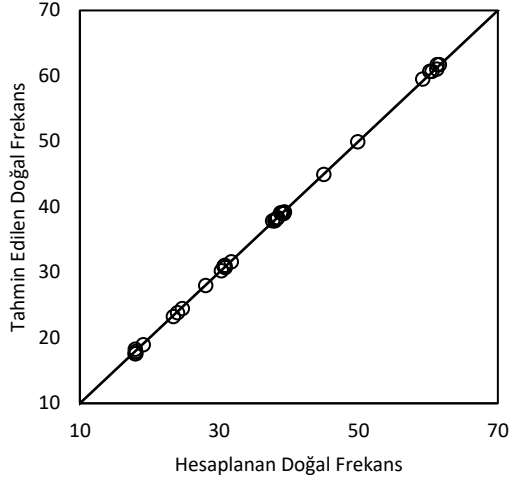
Table 6. GRNN testing results

Model	YSA Eğitim Modeli		
	R <sup>2</sup>	RMSE	MAPE
Model 1	0,997336	0,2942068	10,62085
Model 2	0,999814	0,2253451	0,602711
Model3	0,999911	0,2349525	0,241307
Model 4 $\omega_1$	0,997158	0,2774114	13,99024
Model 4 $\omega_2$	0,999737	0,2068457	0,581803
Model 4 $\omega_3$	0,999908	0,1989003	0,224142

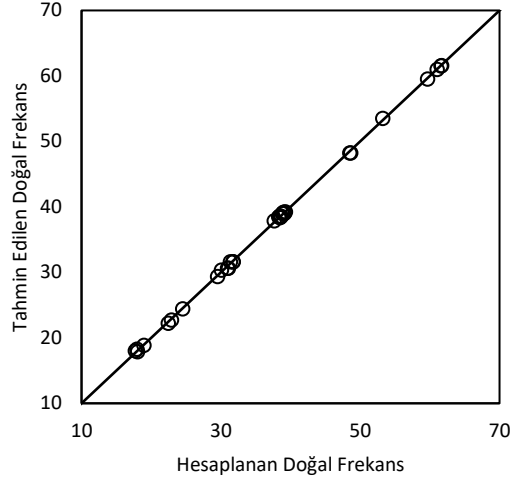
Şekil 3’ te sırası ile tüm modellerin test aşamaları için saçılma diyagramları bulunmaktadır. Diyagramların performans değerleri ile uyumlu olduğu ve hesaplanan-tahmin edilen değer çiftlerinin 45° eğime sahip bir doğru üzerinde buldukları görülmektedir.



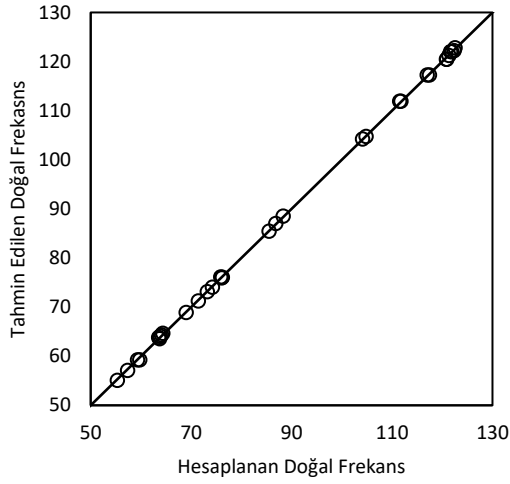
(a) Model 1



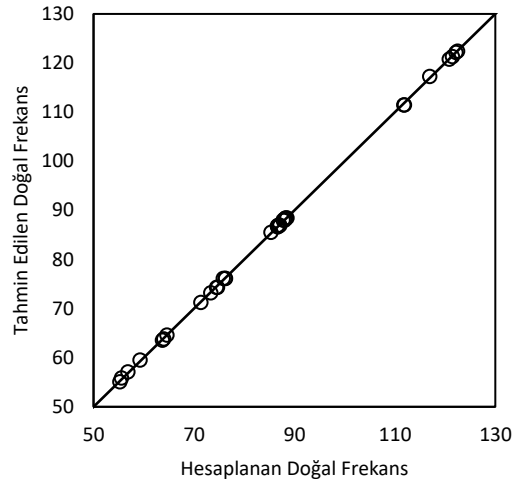
(b) Model 2



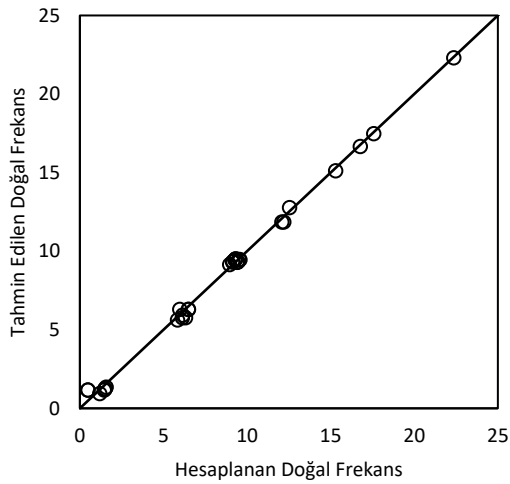
(e) Model 4  $\omega_2$



(c) Model 3



(e) Model 4  $\omega_3$



(d) Model 4  $\omega_1$

Şekil 3. Test modelleri saçılma diyagramı

Figure 3. The scatter diagrams of the test models

Modelin güvenilirliğini kontrol etmek amacıyla Zhang vd. (2016) ile Blevins (1979) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar kullanılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 7’de verilmiştir. Hata değerleri, iki kaynaktan alınan kontrol verileri ile yapılan karşılaştırmada çıkan en büyük fark dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$\%Hata = \left| \frac{\omega_{hesap} - \omega_{tahmin}}{\omega_{hesap}} \right| \times 100 \quad (17)$$

Tablo 7. GRYSA modeli ile elde edilen doğal frekans değerleri ile kontrol verilerinin karşılaştırması  
 Table 7. The comparison of the test data and the values of natural frequencies obtained by GRNN model

		$\beta=0.10$ $k_1=k_3=\infty, k_2=k_4=0$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
0.50	Blevins (1976)		9,7438	39,3532	88,7014
	Zhang ve diğ. (2016)		9,7347	39,3620	88,7146
	GRYSA Modeli		9,7464	39,3512	88,6979
	Hata %		0,12	0,03	0,02
1,00	Blevins (1976)		9,3563	38,9752	88,3250
	Zhang ve diğ.(2016)		9,3207	39,0108	88,3806
	GRYSA Modeli		9,3657	38,9656	88,3104
	Hata %		0,48	0,12	0,08

Tablo 7’de görüldüğü gibi karşılaştırılan doğal titreşim frekansları arasındaki fark, akışkan hızının artması ile artmaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen GRYSA modelleri Blevins (1979) tarafından yapılan çalışmaya daha yakın sonuç vermektedir. Hata değerleri için en büyük farklar dikkate alındığından  $u=1,00$  için Zhang vd, (2016) çalışması ile GRYSA modelleri karşılaştırmasına ilişkin sonuçlar; 1. mod için % 0,48, 2. mod için % 0,12 ve 3. mod için % 0,08 olarak hesaplanmıştır.

## Sonuç ve tartışma

Bu çalışmada akışkan taşıyan borunun doğal titreşim frekansının, direngenlik katsayısına bağlı GRYSA modelleri oluşturulmuştur. Akışkan-yapı etkileşimi ile Hamilton prensibi kullanılarak akışkan taşıyan borunun hareket denklemleri elde edilmiştir. Boyutsuzlaştırılan diferansiyel denklemler analitik yöntemle çözümlenerek doğal titreşim frekansı değerleri hesaplanmıştır. Klasik ve klasik olmayan mesnet şartlarını temsil edecek şekilde 43 farklı kombinasyon, 3 farklı akışkan hızı dikkate alınarak analiz edilmiş ve 387 veri elde edilmiştir. Rijitlik ve akışkan hızı arttıkça doğal titreşim frekansı değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Akışkan hızının 0,20 olması durumunda ankastre-ankastre mesnet şartları altında elde edilen frekans değerleri ilk üç mod için sırası ile 22,3629, 61,6576, 120,8866 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler çalışma kapsamında elde edilen en büyük doğal frekans değerleridir. Mesnet koşulları ve doğal

titreşim frekansı arasındaki ilişki Genelleştirilmiş Regresyon Yapay Sinir Ağı (GRYSA) yöntemi ile MATLAB yazılımı kullanılarak oluşturulan ileri beslemeli geriye yayılımı metodu (İBGY) yardımıyla tanımlanmıştır. 4 eğitim modeli ile gerçekleştirilen çalışma sonuçlarında, hesaplanan ve tahmin edilen değerler arasındaki farkı ifade eden hata değeri % 0,02’ye kadar düşmektedir. Akışkan hızının 1,00 olması durumunda elde edilen en büyük hata % 0,48’dir. En büyük hatanın % 0,48 olarak belirlenmesi, GRYSA yönteminin farklı mesnet şartları altında doğal titreşim frekansı hesabında hız kazandıran alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

## Kaynaklar

- [1] Aldraihem, O. J. (2007). Analysis of the dynamic stability of collar-stiffened pipes conveying fluid, Journal of sound and vibration, 300(3-5), 453-465.
- [2] Al-Hilli, A. H. (2013). Free vibration characteristics of elastically supported pipe conveying fluid, Alnahran Journal For Engineering Sciences, 16(1), 9-19.
- [3] Alp, M., & Cigizoglu, H. K. (2010). Farklı yapay sinir ağı metodları ile yağış-akış ilişkisinin modellenmesi, İTÜ Dergisi/d, 3(1).
- [4] Blevins, R. D. (1979). Formulas for natural frequency and mode shape.
- [5] Cigizoglu, H. K. & Kişi, Ö. (2005). Flow prediction by three back propagation techniques using k-fold partitioning of neural network training data, Hydrology Research, 36(1), 49-64.
- [6] Dağlı, B. Y. & Sınır, B. G. (2015). Dynamics of transversely vibrating pipes under non-classical

- boundary conditions, *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 3(2), 27-33.
- [7] Dagli, B. Y. & Ergut, A. (2019). Dynamics of fluid conveying pipes using Rayleigh theory under non-classical boundary conditions, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 77, 125-134.
- [8] Han, S. M., Benaroya, H., & Wei, T. (1999). Dynamics of transversely vibrating beams using four engineering theories, *Journal of Sound and vibration*, 225(5), 935-988.
- [9] Liu, Z., Yin, Y., Wang, F., Zhao, Y., & Cai, L. (2013). Study on modified differential transform method for free vibration analysis of uniform Euler-Bernoulli beam, *Structural Engineering and Mechanics*, 48(5), 697-709.
- [10] Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W. & Rothmayer, A. P. (2013). *Fluid mechanics*, Singapore: Wiley.
- [11] Laursen, E. M. (1960). Scour at bridge crossings. *Journal of the Hydraulics Division*, 86(2), 39-54.
- [12] Paidoussis, M. P., & Issid, N. T. (1974). Dynamic stability of pipes conveying fluid, *Journal of sound and vibration*, 33(3), 267-294.
- [13] Samarasinghe, S. (2016). *Neural networks for applied sciences and engineering: from fundamentals to complex pattern recognition*, Auerbach publications
- [14] Tayfur, G. (2014). *Soft computing in water resources engineering: Artificial neural networks, fuzzy logic and genetic algorithms*, WIT Press,
- [15] Tayfur, G. (2017). Modern optimization methods in water resources planning, engineering and management, *Water Resources Management*, 31(10), 3205-3233,
- [16] Yi-Min, H., Yong-Shou, L., Bao-Hui, L., Yan-Jiang, L., & Zhu-Feng, Y. (2010). Natural frequency analysis of fluid conveying pipeline with different boundary conditions, *Nuclear Engineering and Design*, 240(3), 461-467.
- [17] Wiggert, D. C. & Tijsseling, A. S. (2001). Fluid transients and fluid-structure interaction in flexible liquid-filled piping, *Applied Mechanics Reviews*, 54(5), 455-481.
- [18] Zhang, T., Ouyang, H., Zhang, Y. O., & Lv, B. L. (2016). Nonlinear dynamics of straight fluid-conveying pipes with general boundary conditions and additional springs and masses, *Applied Mathematical Modelling*, 40(17-18), 7880-7900.



## Towards Zero Waste in Construction: A Case Study Using Green Building Certification Systems

Duygu Erten <sup>1,\*</sup>

İstanbul Medipol Üniversitesi, School of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, İstanbul, Turkey, Orchid ID 0000-0002-9092-2417

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 23 December 2019

Received in revised form  
10 May 2020

Accepted 23 May 2020

Available online 15 June 2020

## Keywords:

*Zero Waste, Construction,  
Demolition, Certification*

## ABSTRACT

In many countries of the world like Turkey there are extensive civil engineering constructions in the forms of buildings, skyscrapers, dams, bridges, canals, culverts, pipes and roads. Each one of these activities lead to wastages that need to be dealt with ecosystem friendly coupled with economic, social and environmental sustainability purposes. Construction materials from the resources through their usages and demolition need special attention for end-product as minimum as wastage generation after reuse possibilities. The linear process of successive resources, usages and landfill end planning is the simplest alternative, which has been applied so far in any country or society, especially, by local governments and companies. Although, between usage and the landfill are interstate reuse benefits, but they are marginal, because the landfills bury large amounts of reuse benefits. Since almost ten years, circular waste treatment programs came into view with extensive consideration, which prior to landfill extracts demolition materials as much as possible for reuse with the aim of zero waste (ZW). The application sources and possibilities of this trend is exposed for Turkish construction circles with the commercialization of more demolished materials for extra economic return. Thus, this study can be useful to policy and decision makers in developing the ZW guidelines in construction sector by using Site Waste Management Plans (SWMP)s.

Doi: 10.24012/dumf.650228

## Introduction

Solid waste management is one of the most important urban services, yet it is complex and expensive, accounting for approximately 20 % of municipal budgets in low-income countries and 10% of municipal budgets in high-income countries [1]. Sources of solid waste generation are residential, commercial, institutional in addition to construction and demolition waste (CDW), municipal solid, industrial, agricultural and treatment plant wastes [2]. CDW is the heaviest among waste streams which accounts approximately for 25% - 30% of waste generation. It consists of numerous materials, including,

concrete, bricks, gypsum, wood, glass, metals plastic, solvents, asbestos and excavated soil, many of which can be recycled. According to the latest report on CDW by EU, CDW is 30% of the total waste and 60% of this waste is deposited to landfills. This can be an expensive process in some countries like in UK since 32% of landfill waste comes from construction and demolition of buildings and 13% of products delivered to construction sites are sent directly to landfill without being used [3]. In 1996, Finance Act introduced a tax on waste disposal on all landfill sites registered in UK in order to discourage landfill disposals .

\* Duygu Erten  
✉ [derden@medipol.edu.tr](mailto:derden@medipol.edu.tr)

A study for Australian market found that on the average, about 15% of solid waste landfilled are generated from construction activities annually [4].

Construction and demolition activities generate waste which can be reduced during the construction process. The reduction is not only good for environmental reasons; it could also reduce the overall project cost. A study revealed that the average percentage contribution of building material wastage to project cost overrun is between 21-30% [5].

CDW accounts for approximately 40% of all waste generated in USA [6] which has great opportunity to create closed material loops in a circular economy (CE). Due to an understanding of the needs to minimize waste generated by construction activities, various studies have been carried out to determine both causative factors and preventive measures. This has led to an understanding that construction waste is caused by various activities at design, procurement and construction stages of project lifecycle [7]. There are also other classifications in literature. Building Research Establishment (BRE) of UK defines waste in four stages in the built environment: design, take off/specification, delivery and site waste [8]. Characteristic and universal construction waste types are identified by several organizations including United States Environmental Protection Agency (EPA) and European Union (EU). As a result, special attention is being paid to CDW management at the European level, which is having implications for national-level policies. CDW management is steered in particular by the EU Waste Framework Directive (2008/98/EC), which sets a target for the recycling of non-hazardous CDW at a minimum of 70% of its weight by 2020 [9]. The remaining wastes that cannot be diverted to landfills are collected in a way that separation of items is very difficult so that some valuable components turn into waste (down-cycled). There is a high potential for recycling and re-use of CDW, since some of its components have a high resource value. There is a re-use market for

aggregates derived from CDW in roads, drainage and other construction projects. This research aims to present ways to find out the typical type and amount of waste material in a typical green building project site through Site Waste Management Plans (SWMP). An SWMP should describe how materials will be managed efficiently and disposed of legally during the construction of the works, explaining how the re-use and recycling of materials will be maximised. This involves estimating how much of each type of waste is likely to be produced and the proportion of this that will be re-used or recycled on site, or removed from the site for re-use, recycling, recovery or disposal.

In the light of environmental challenges derived from the current linear economy model of take-make-consume-dispose, the construction industry requires the implementation of new, enhanced building strategies focused on the problem of CDW [10]. The transition to CE helps the construction industry to optimize the use of materials and their value throughout their lifecycle phases, and to minimize waste. CDW is identified in CE policies as a priority [11]. In the European Union, CE has become a central aspect of the development of policies and strategies, as part of the CE Action Plan [12].

Since almost ten years, circular waste treatment programs came into view with extensive consideration, which prior to landfill extracts demolition materials as much as possible for reuse with the aim of zero waste (ZW). The application sources and possibilities of this trend is exposed for Turkish construction circles with the commercialization of more demolished materials for extra economic return. This research aims to present ways and methods to find out the zero waste opportunities in CDW by:

- Identify the waste with the highest CE potential by using a case study
- Modelling sample waste data from 10 green building projects (certified) which are rather randomly distributed by some probabilistic and statistical approaches,



- Identifying the responsibilities of municipalities as policy and decision makers in developing the ZW guidelines in construction sector by using Site Waste Management Plans (SWMP)s.

Identification of waste; in a typical project requested as data in a SWMP covers the non-hazardous waste related to on-site construction and dedicated off-site manufacture or fabrication (including demolition and excavation waste) generated by the building's design and construction. Standard construction projects do not produce SWMPs but they are mandatory for getting green building certification systems.

The case study project selected is a green campus located in western part of Turkey. All buildings on the campus are certified with an international green building certification system. The SWMP data from the project is used as part of this study.

CE priority opportunities of construction waste identified by a study prepared by ZeroWaste Scotland(ZWS) is used as a framework as shown in Table 1. Several different approaches were taken to identifying and prioritizing key intervention opportunities from different perspectives within this framework. A qualitative review of the combined outputs from the three assessments, informed identification of a shortlist of priority opportunities. The comments for Turkey's construction sector are prepared after reviewing the current situation in Turkey by using the same set of shortlist opportunities provided for ZWS.

## Materials and Methods

### *Waste Management*

There is a high potential for recycling and re-use of CDW, since some of its components have a high resource value. The amount and type of CDW depends on type of projects, size of the projects, activity performed and construction technology [13]. Other similar study findings also present that volumes, composition and quality of CDW vary between sites, regions and countries, and no general composition can be presented [14,15]. Responsible management of waste is an essential aspect of sustainable buildings. The environmental impacts associated with buildings do not end with their construction,

but continue throughout their use, renovation, and end of life. Building demolition materials at the end of life embody all the upstream impacts associated with delivering and operating buildings, including soil erosion, top soil loss, habitat disruption, natural resource depletion, water and air pollution, climate disruption and land expenditure. International green building certification systems like BREEAM and LEED have criterias, which present the opportunities existing for the beneficial reduction and recovery of materials that would otherwise be destined for disposal as waste during construction stage. Based on the 10 global markets covered by a CBRE report, it is documented that still 18.6% of office space (offices have the highest demand for certification) is certified as green [16]. Despite the increase from just 6.4 % a decade ago, in 2007, most of the new construction market's handling of construction waste in developing countries do not follow a system of minimizing waste despite the existence of laws. To make their business more sustainable, construction companies should consider closed-loop circular design principles as described in Figure 1 and embed them into their product portfolio and business models [17]. Despite the success of green building certification systems for providing solutions for minimizing the construction waste problem, most of the ongoing construction follows the standard construction procedures, when it comes to producing and disposing wastes. A study conducted in Malaysia for formulation of appropriate policy interventions in addressing the construction waste management problem, indicated the importance of procurement of materials, recycling and re-use and rewarding contractors for waste minimization. The study also indicated the importance of government providing guidelines for contractors in implementing waste reduction [18].

### *Building Activities in Turkey*

Turkey's construction industry has developed rapidly since the 1950s with the support of major infrastructure projects and an ongoing urban regeneration plan. In the first quarter of 2018, the construction sector's contribution to economic growth in Turkey was 6,9 %, while the growth in

real estate transactions was 2,9 % and construction investments continued to contribute to the growth of Turkey's economy by 12,3 %. At the same period, there was a growth in the residential, non-residential and infrastructure projects [19]. The problem in many developing countries is the lack of data on construction and demolition waste (CDW) produced [20]. It is reported that there is no net data regarding the amount of construction and demolition wastes in Turkey [21]. As the planned urban transformation projects continue to take place in Turkey, a national system to track and efficiently manage the CDW will be needed.

### *Construction Project Pipeline*

Mega projects are large-scale, complex ventures that typically cost a billion dollars or more, take many years to develop and build, involve multiple public and private stakeholders, are transformational, and impact millions of people. They are a completely different breed of project in terms of their objectives, lead times, complexity, and stakeholder involvement [22]. Megaprojects may be evolving into giga-projects and even tera-projects in the future meaning more CDW generation. The future of CWD generated for mega projects in developing countries, where green building certifications are not used and a national system does not exist cause waste of resources. Turkey is a growing country with many milestone projects and investments on different areas. The review of Turkey's construction sector identified 1,500+ projects across urban regeneration, social and private housing, commercial, light industrial, education, health campuses, transport, utilities, ports and energy. Turkey's megaprojects are constantly growing ever larger in a long historical trend along with global mega projects like The Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge, Jubail II-Industrial City of Saudi Arabia, Beijing Daxing International Airport, London Crossrail, Dubailand, California High Speed Rail and International Space Station. Turkey will also demolish some of its existing housing stock and develop 6,500 000 housing until 2034 based on Law No. 6306 on restructuring of areas under risk of natural disasters [23]. The estimated CWD to be generated from these projects is

500.000.000 tons [24]. The current annual amount of 45 million tons of CWD in Turkey is estimated to increase to 10 million tons/year. The estimated recycling rate provided by TC Ministry of Environment and Settlements for this amount is 6 million tons/year. There are two types of construction activities creating waste generation. First one creates CDW up to 2 tons described as small-scale and second one creates 2 tons of CDW described as large-scale [25]. Over 100 million tons of CDW were recycled or disposed in 2014 in Turkey [26].

### *Policies, Laws, Regulations and Incentives*

The European Community (EC) Waste Directive mentions under Art 11- 2b that: by 2020, the preparing for re-use, recycling and other material recovery, including backfilling operations using waste to substitute other materials of non-hazardous construction and demolition waste excluding naturally occurring material defined in category 17 05 04 in the list of waste shall be increased to a minimum of 70 % by weight. The Turkey's government has been adopting various measures to reduce waste generation from construction activities along with EC Directives. In accordance with Article 9 of the regulation; excavation, construction and demolition generating facilities are obliged to implement waste management in a way that will minimize the adverse effects of waste on the environment and human health. The first regulation, which is now a law mandates contractors creating CDW to prepare a CDW management plan [25]. The Regulation on Waste Management provides a single comprehensive framework for waste management [26]. However, in the absence of major economic incentives, attempts to significantly promote the recycling behavior may not be easy to drive the requisite behavioral change [27].

### *Circular Economy Thinking and the Built Environment*

The concept of CE is a vibrant subject area in the academic community involving various schools of thought such as cradle to cradle, performance economy, industrial ecology and biomimicry [28]. CE as a concept builds on a mountain of themes relating to waste reduction, recycling,

reuse, material efficiency, security of supply, sustainable consumption and production, better design, sharing of resources etc. as the strands of circular economy thinking [29]. Circular economy thinking in Turkey is still at its infancy. On the other hand, green building movement is transforming standard products to ones with eco labels through the demands of green building certifications used in the market. New strategies to create efficient products are bound to generate an added value to products while others add value to the product of a component (example: buildings). The current economy can be largely described as linear, but a CE is restorative by design, and aims to keep products, components and materials at their highest utility and value, at all times [30]. The CE is about optimizing systems rather than components, which includes careful management of materials in both biological and technical cycles. In technical cycles, materials are maintained, reused, refurbished and (as a last resort) recycled. In biological cycles, non-toxic materials are cascaded and eventually returned to the soil, thus restoring natural capital [30]. There is a limited research on CE within a whole systems context and wide spread practical applications at the product and component level [31]. For example, all green construction projects have waste management plans, but much of the waste is down cycled, where the value, quality and functionality are lower than the original product [32]. CE and business models for this system arising from “design-use-re-use” loop define waste as a resource.

The Zero Waste International Alliance (ZWIA) defined Zero Waste (ZW) as a goal that is ethical, economical, efficient and visionary, to guide people in changing their lifestyles and practices to emulate sustainable natural cycles, where all discarded materials are designed to become resources for others to use. The revised definition of ZW is conservation of all resources by means of responsible production, consumption, reuse, and recovery of products, packaging, and materials without burning and with no discharges to land, water, or air that threaten the environment or human health [33]. The zero waste approach is particularly important in industrial and building processes as it promotes

the full use of industrial or construction inputs in final products or modifying them to better fit other industries or processes without generating waste [34]. Implementing ZW principles is building the circular economy thinking in construction, which is in its infancy. Circular economy thinking means maintaining access to materials and resources for continual and future use. With an ever expanding human population and rising standards of living across the globe, it is likely to be the only viable option to maintain standards of living [35]. The research presents best practices from EU building sector, while drawing a roadmap for developing countries by taking into consideration the risk levels in the net floor area, metal, plastic, paper cardboard, insulation and total wastage. In order to plan the ZW guidelines in the construction sector, the identification of CE opportunities for Turkey’s construction sector has been investigated along with the review of waste credits in LEED and BREEAM certification systems [35, 36].

#### *Green Building Certification Systems*

LEED and BREEAM two widely used green building certification systems are used to help the discussion and plan a roadmap for the research. BREEAM is the UK’s Environmental Assessment Method for Buildings, developed by the Building Research Establishment (BRE). The first versions of BREEAM were published in the early 1990’s and since early 2000’s BREEAM is UK Government requirement for publicly funded projects. BREEAM is now an internationally recognized and used system. In 2000, the U.S. Green Building Council (USGBC) established the LEED green building rating system to define and measure green buildings. LEED is an internationally recognized green building certification providing third-party verification that measures how well a building or community performs across the metrics that matter most. The intent of waste credits in green building certification systems like LEED and BREEAM is to provide strategies and tools one needs to develop and implement a successful site waste management plan. There are other international systems and national programs in UK’s like Smart waste [37] and USA International Code Council’s ICC-ES program

[38], ICC's International Green Construction Code (IGCC) [39], National Association of Homebuilders (NAHB) [40] etc. to promote sustainable construction. These programs, some of which include certification components, all incorporate aspects of recycling CDW. In UK BREEAM system, SWMP is prepared describing how materials will be managed efficiently and disposed of legally during the construction of the works. The aim is to promote resource efficiency via the effective management and reduction of construction waste. This involves estimating how much of each waste type is likely to be produced and the proportion of this that will be re-used or recycled on site, or removed from the site for re-use, recycling, recovery or disposal. Since 1st of December 2013, construction sites in England no longer legally require a Site Waste Management Plan (SWMP)

[41]. However, SWMPs are continuing to be used on many projects as best practice or 'minimum standard' by BRE. The plan needs to be prepared at the beginning of the project, before construction, demolition, refurbishment, or maintenance and repairs are undertaken. It must always be prepared before works begin.

In BREEAM, Construction Waste issue is split into two parts: Construction resource efficiency (3 credits), Diversion of resources from landfill (1 credit).

Construction waste groups are sorted according to EU Waste Catalogue [42]. The management of CDW on a site requires the general contractor to document the progress of the plan against the goals laid out on SWMP or compliance documents that needs to be filed. SWMP requires waste to be sorted.

**Table 1.** Circular Economy Priority Opportunities

Key Opportunities	Shortlist opportunities	Relevance for Turkey's Construction Sector Research and interviews	Potential Impact	
			No impact	Has impact
1	Modular Design	Improvements are needed for Turkey's modular building manufacturing sector.	✓	
2	Circular Timber in Construction	Identification of Certified Timber production need is initiated but not commercialized yet.		✓
3	Circular Aggregates (including concrete, brick, soils and stones)	Turkey is #3 in aggregate production in Europe* but no data for recycled aggregates are available. Recycling to a realistic level, emphasizing the technical implications and environmental and economic limitations of recycling, while examining the necessary conditions for its future potential has to start.		✓
4	Structural Steel and Aluminum Reuse	Limited reuse of structural metals currently occurs. Legal intervention such as reducing taxation on reused products would promote greater reuse.		✓
5	Closed Loop and lean design and construction plasterboard	The full engagement of plasterboard manufacturers to develop recycling practices is needed.		✓
6	Making retrofit and refurbishment	Debate on sustainable retrofits need to start and funded pilot projects needed.		✓

7	Large infrastructure and regeneration projects-circular scoping studies, material banks/reuse hubs	Insert circular strategies into specifications, procurement requirements, tools and processes, etc.	✓
8	Improving building utilization & usage	Incentivize developers to optimize occupancy due to ratable value schemes.	✓

**Table 2.** European Union summarizing the construction and demolition wastes

Section#	TYPE	Case Study	Assessment of Priority
17 01 01	Concrete		Opportunity 3
17 01 02	Bricks		Opportunity 3
17 01 03	Tiles and ceramics		Opportunity 3
17 02 01	<b>Wood</b>	<b>X</b>	<b>Opportunity 2</b>
17 02 02	Glass	X	
17 02 03	Plastic	X	
17 04 01	copper, bronze, brass	X	
17 04 02	<b>Aluminium</b>	<b>X</b>	<b>Opportunity 4</b>
17 04 03	Lead	X	
17 04 04	Zinc	X	
17 04 05	<b>Iron and steel</b>	<b>X</b>	<b>Opportunity 4</b>
17 04 06	Tin	X	
17 04 07	Mixed metals	X	
17 05 04	Soil and stones (not containing hazardous substances)	X	
17 06 04	Insulation materials (not containing hazardous substances and asbestos)	X	

**Table 3.** Pilot Project Construction Site Waste Management Plan

WASTE	METAL (kg)	Target	PLASTIC (kg)	Target	PAPER (kg)	Target	INSULATION and other (excavation) (kg)	Target	WOOD (m3)	Target	GLASS (kg)	Target
<b>YEAR</b>												
2012												
August					150	160						
September	3466	4000										
October	2033	4000										
November	3720	4000										
November	5200	4000										
November	3744	4000										
November	8525	5000							10725	12240		
December	6449	5000										
<b>YEAR</b>												
2013												

January	7433	5000	150	200	200	215			6600	6500
February			350	200					11000	11500
February	4720	5000							27060	27500
March	1220	5000	530	700	650	680			99000	99500
March	3570				520	525				
April	5700	5000	680	7000	1730	1600				
May	1660	4000	980	700	420	380			85800	87000
June	3200	4000	400	500	630	625	16978	18000	312400	314000
July	5100	4000	630	500			12168	13450	369600	370000
August	5042		1230	1300	1530	1600			79200	80000
September	5120		2950	3000	2440	2500			23760	235000
October	2912		1170	1150	1090	1250				3000 3500
November	3445		860	850	750	850				
December	800		940	1000	1130	1180				
TOTAL	78817		9070		9360		29147		1238985	3000
Total Waste (kg)									1,368,379	
Total Recycled waste (kg)									1,339,232	
Recovered from site by a licensed external contractor and recycled.									97,80 %	

**Table 4.** Waste data for the selected 10 green building projects

Project	Location	Net Floor Area	Metal (kg)	Plastic (kg)	Paper/ Cardboard (kg)	Wood (kg)	Glass (kg)	Insulation and Other (kg)	Concrete	Gypsum
1	TUZLA	24156	78817,43	9070	9360	29148	3000	29147,51	-	-
2	K.ÇEKMECE	30685	95900	479500	93800	-	-	383600	-	-
3	ŞİŞLİ	203384	24280	28750	18850	28700	18410	20900	-	-
4	ATAKÖY	34978	86490	870	5820	1960	900	18100	9420	1050
5	ÇANKAYA	5500	21000	3005	6010	2002	1002	4000	4000	2000
6	GÜNEŞLİ	16240	20000	4000	9000	4000	1	8000	24000	2000
7	MENDERES	17600	89100	1220	1110	-	50	27030	-	-
8	KARŞIYAKA	13029	37760	1000	1500	1000	-	5000	20000	-
9	AFYON	1900	4350	50	1050	-	100	1350	-	-
10	KÜÇÜKYALI	58544	171500	8000	9100	10900	7300	34000	10800	4500

LEED classifies waste management credits under the Materials and Resources (MR) section. The MR credits address all the strategies in the United States Environmental Protection Agency's (EPA) solid waste management hierarchy: reduction, reuse, recycling and waste to energy. LEED has five project types, and each one has different credits for waste management. Alternative daily cover (ADC) does not qualify as material diverted from disposal. Land-clearing debris is not considered construction, demolition, or renovation waste that can contribute to waste diversion. Crushing asphalt, concrete, and

masonry for infill or aggregate is also considered onsite waste diversion. For projects that cannot meet credit requirements using reuse and recycling methods, waste-to-energy systems may be considered waste diversion if the European Commission Waste Framework Directive 2008/98/EC [43] and Waste Incineration Directive 2000/76/EC [44] are followed and Waste to Energy facilities meet applicable European Committee for Standardization (CEN) EN 303 standards [45].

### Case Study and methodology

A study prepared by ZeroWaste Scotland (ZWS) is used as a framework for this research which is based on an analysis to identify the following CE priority opportunities. Several different approaches were taken by ZWS analysis to identify and prioritize key intervention opportunities from different perspectives.

A qualitative review of the combined outputs from the three assessments informed identification of a shortlist of priority opportunities. The comments for Turkey's Construction Sector are prepared after Turkey's planned construction, refurbishment and demolition projects to 2025 are identified. By using the same set of shortlist opportunities provided for ZWS, a desk-based review of high impact CE opportunities in the light of the planned construction pipeline is completed as listed in Table 1. Table 2 from EU categorizes the Construction and Demolition Wastes. The waste types corresponding to CE Priority Opportunities are identified. The data from the pilot project's SWMP is gathered and analyzed. The results from the waste management plans can be used to identify and quantify the volume and sort of construction waste. Metal, plastic, paper, insulation and other waste (excavation), wood and glass are the typical waste collected from a construction site as can be seen from the case study. From the collected waste data, with 67% collection rate, metal is found to have the highest potential to be considered for re-use and has a great potential for CE corresponding to opportunity 4. The 12 different waste groups from the case study project provided in SWMP is analyzed for CE opportunities based on the findings presented in Table 2. Based on the data, circular timber in construction, circular aggregates (including concrete, brick, soils and stones) and structural steel and aluminum reuse can be the priorities of CE discussions for construction sector in Turkey.

The "Zero Waste and Climate Change Departments" are planned to be established under Municipalities in Turkey [46] in the near future. They can use the information obtained from this research to prioritize the demolished materials for extra economic return.

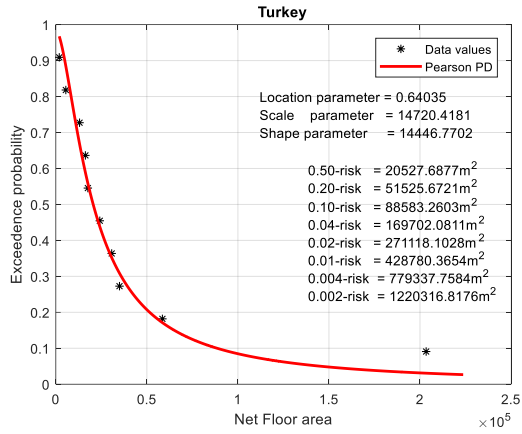
### Risk assessment of some Turkish wastes

In Table 3, a pilot project's waste collection variables are shown to fulfill the requirements of a SWMP. The project is located in the western part of Turkey. Table 5 indicates the amounts of total waste and recyclable waste in addition to percentage of recycled waste for each green building project.

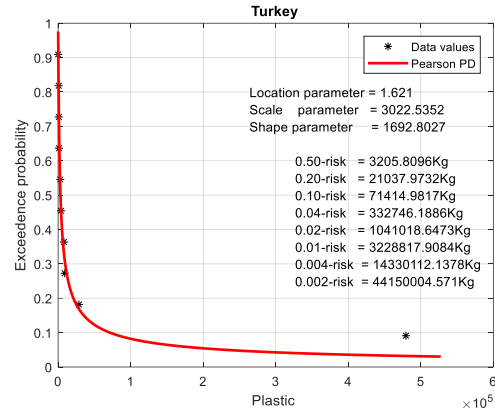
After the scatter diagram of exceedence probability, which represents the risk level, each variable is searched for the best theoretical probability distribution function (PDF). There is no need to present these theoretical PDFs mathematical expressions, which can be found in any textbook on probability and statistics [47, 48]. Figures 3a through 3f present six of these variables, namely, net floor area i.e. space area, metal, plastic, paper cardboard, insulation and total wastage amounts. The PDF models appear as Pearson and Log-normal, types.

**Table 5.** Recycled Waste

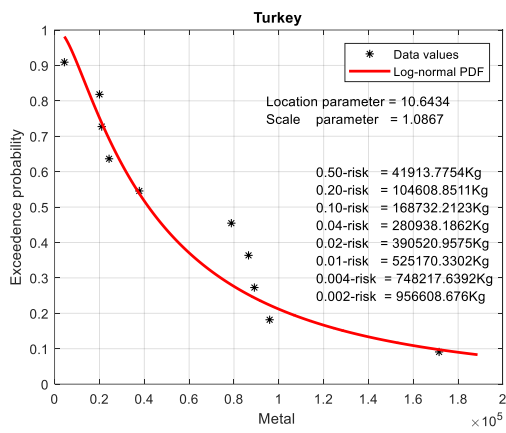
Project	TotalWaste (kg)	Total Recyclable Waste (kg)	% Recycled
	1	1368379	1339232
2	1052800	669200	63,56%
3	139890	118990	85,06%
4	124610	106510	85,47%
5	43000	37000	86,05%
6	72000	64000	88,89%
7	118510	91480	77,19%
8	66260	57760	87,17%
9	6900	5550	80,43%
10	256100	222100	86,72%



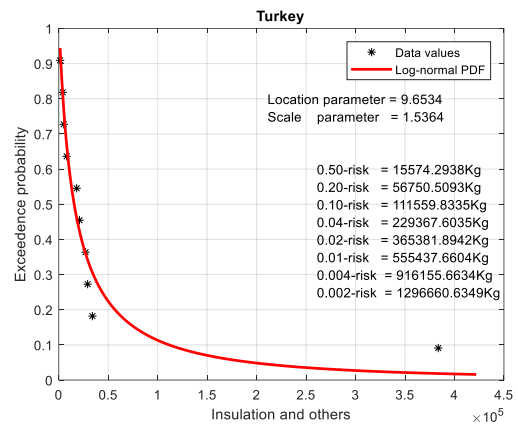
(a)



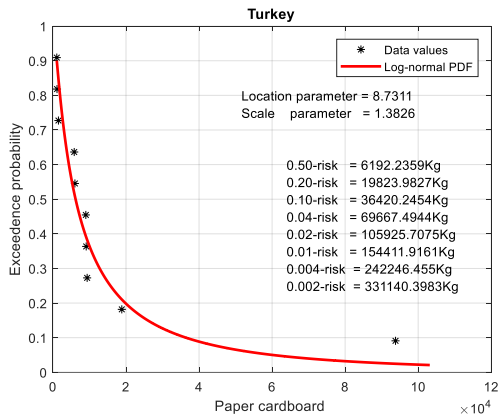
(d)



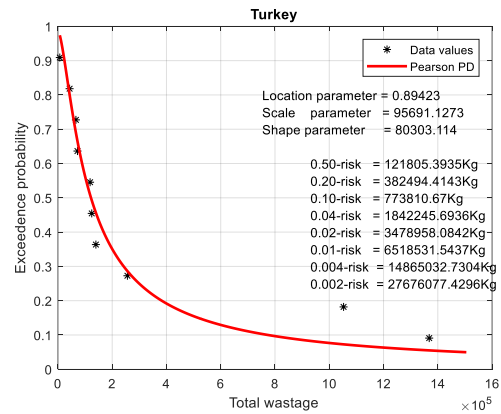
(b)



(e)



(c)



(f)

Figure 3. Risk assessments a) net floor area, b) metal, c) plastic, d) paper cardboard, e) Insulation and Others, f) total Waste



In the same figures the statistical parameters of each PDF are given in addition to the 0.50, 0.20, 0.10, 0.04, 0.02, 0.01, 0.004 and 0.002 risk levels. For the sake of discussion, the PDF graph for total wastage interpretation is given along the following points and similar interpretations can be made for the others.

If the data are for certain duration of time then the risk levels can be associated with time durations,

For instance, provided that the total wastage is per months then, say, 0.50 risk corresponds to the inverse of duration, which is  $1/0.5 = 2$  months

and for 0.02 risk level corresponds to  $1/0.02 = 50$ -month duration,

The risk level of 0.50 value corresponds to the arithmetic average value.

### Conclusions

CDW is the heaviest among waste streams and the amount is growing as the construction sector grows. It consists of numerous materials that can be recycled. For standard projects waste producers are not required to provide accurate data. But construction and demolition waste management data are critical in creating policy and planning for national waste management and reporting.

This study suggests that in countries where a waste reporting system for CDW collection, recycling and disposal do not exist as a national program, the methodologies in widely used international green building certification systems for waste minimization can be used for predict the waste streams. Data obtained from SWMPs developed for green building projects can be used to create risk models and the amount of waste to be generated during a construction can be interpolated. Understanding how much waste is generated during a construction project as well as the types of waste generated for long term storage, disposal, energy recovery and recycling will help local governments in developing the zero waste (ZW) guidelines and national waste reporting in construction sector. As the mathematical model shows, by implementing the suggested methodologies, and using data obtained from SWMPs, waste forecasts for new-

build construction projects can be estimated for properly handling.

Based on the data obtained from pilot projects in this research, circular timber in construction, circular aggregates (including concrete, brick, soils and stones) and structural steel and aluminum reuse can be the priorities of CE discussions in Turkey. From the collected waste data of a green campus project, the metal has the highest collection rate (67%). Once metal enters the material-to-material loop, in which it is recycled many times, it will always be available for future use because it is permanent material. The metal packaging industry is a great example of a circular economy since metal can be recycled forever in a material-to-material loop.

As the planned urban transformation projects continue to take place in Turkey, a national system to track and efficiently manage the CDW data is needed. The optimum levels of waste reduction for re-use and recycling can be achieved through mandatory usage of SWMPs. Once the source control is obtained through use of SWMPs, a circular design and construction standard for reducing CDW can be developed.

Municipalities need to develop strategies to include implementing CDW supervision and management systems to increase circularity. Monitoring the treatment and delivery of CDW among producers, collection, transport and treatment companies are needed. Creating partnerships with government, private sector and NGOs to develop priorities, key barriers and needs also have to be analyzed for future research. Once the standards are in place and barriers obstructing the circular utilization of CDW are presented, commercialization of demolished materials for extra economic return may be fully utilized.

### Acknowledgements

The data used in this study were obtained from 11 project sites. The author would like to acknowledge the efforts and support of the contractors providing data.

## References

1. Kaza, S., Yao, Lisa C., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F., (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050, doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0. Washington, DC, World Bank.
2. Tchobanoglous, G. and Kreith, F. (2002) Handbook of Solid Waste Management. McGraw-Hill, New York.
3. UK Technology Strategy Board Report, 2016, Print ISBN 9781474134378
4. Mcdonald, B., & Smithers, M. (1998). Implementing a waste management plan during the construction phase of a project: A case study. *Construction Management & Economics*, 16 (1), 71-78
5. Ameh O.J., Itodo E.D. (2013). Professionals' views of material wastage on construction sites and cost overruns, *Org. Technol. Manage. Constr.: Int. J.*, 5 (1), pp. 747-757
6. EESI, (2014). How Better Recycling Can Minimize Waste and Boost the Economy, Environmental and Energy Study Institute, Washington DC.
7. Ekanayake L.L. Ofori, G., (2004). Building waste assessment score: design-based tool, *Build. Environ.*, 39 (7), pp. 851-861
8. BRE, Available on URL <https://www.bregroup.com/products/breem/> (Accessed on 5.5.2019)
9. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Available on URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj> (Accessed on 10.2.2019)
10. L. Jaillon, C.S. Poon, Life cycle design and prefabrication in buildings: a review and case studies in Hong Kong, *Autom. Con Struct.*, 39 (2014), pp. 195, 202, 10.1016/j.autcon.2013.09.006
11. European Commission (EC), 2015b, Closing the Loop - an EU Action Plan for the Circular Economy. Communication from the EC to the EU Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, EC, Brussels.
12. European Commission, 2018a, European Commission Circular Economy Package, Available on URL: [http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm) (Accessed on 3.10.2019)
13. Masudi, A. F., Hassan, Ch. R. Ch., Mahmood, N. Z., Mokhtar, S. N., Sulaiman, N. M. (2011). "Construction waste quantification and benchmarking: A study in Klang Valley, Malaysia" *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 5, pp. 909-916.
14. Bergstal H., Bohne, R.E., Brattebø, H., (2007). Projection of construction and demolition waste in Norway. *J. Ind. Ecol.* 11 (3).
15. Monier V., Hestin, M., Trarieux, M., Mimid, S., Domrose, L., Van Acoleyen, M., Hjerp, P., Mudgal, S., 2011. Study on the Management of Construction and Demolition Waste in the EU. Contract 07.0307/2009/540863/SER/G2, Final report for the European Commission (DG Environment).
16. Rogier H., Kök N., Pogue D. (2018). International Green Building Adoption Index: A report by prepared by CBRE.
17. Ellen MacArthur Foundation (EMF) and Fung Global Institute (FGI), (2014). Towards a Circular Economy in Asia: Issues and Opportunities. Hong Kong: Fung Global Institute.
18. Begum R.A, Siwar C., Pereira J. J., Jaafar A. H. (2007). Implementation of waste management and minimisation in the construction industry of Malaysia, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 51, Issue 1, Pages 190-202, ISSN 0921-3449.
19. TCA (2018). Analysis of Construction Sector of Turkey. A report prepared by Turkish Contractors Association, Ankara, Turkey.
20. Erten D., (2018). Cradle to Cradle: Waste, *SD Journal*, Volume: 45, April 78-81.
21. Esin T. and Cosgun N., (2007). A study conducted to reduce construction waste

- generation in Turkey., Building and Environment Vol. 42(4), pp. 1667-1674.
22. Flyvbjerg B. (2014). What you should Know about Megaprojects and Why: An Overview. Project Management Journal, Vol 45 (April/May), Number 2.
23. Law 6306, URL Available at: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/altyapi/icerikler/6306-sayili-kanun-20190927161544.pdf>. (Accessed on 3.10.2019)
24. Kılıç Y., Kara M., Şahin A., Demir M., Özalp F., Yılmaz H. D., (2016). Urban Regeneration and Implementation Processes in Turkey, First International Congress on Urban Environment and Health, May 11-15.
25. MEF (2004). Regulation on control of excavation soil, construction and demolition waste. Ministry of Environment and Forestry. Issue of Official Gazette: 25406
26. MEU (2018). National waste management action plan 2023. Ministry of Environment and Urbanization.
27. Ulubeyli, S., Kazaz A., Arslan V. (2017). Construction and demolition waste recycling plants revisited: management issues. Procedi Engineering. 172: 1190-1197.
28. Thornback J. (2016). Circular Economy Thinking in Construction: A View from UK Manufacturers. Construction Products Association, London, UK. See <http://www.constructionproducts.org.uk/media/87907/cpa-circular-economy-thinking-the-role-ofmanufacturers-12-february-2016.pdf>
29. Thornback J. and Adams K. (2016). Knowledge Resource for Circular Economy Thinking in Construction. Green Construction Board, London, UK. See <http://www.greenconstructionboard>.
30. Ellen MacArthur Foundation (2015). Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition.
31. Adams K., Osmani M., Thorpe A. and Thornback J., (2017). Circular economy in construction: current awareness, callenges and enablers, ICE Proceedings.
32. Walsh, B., (2012). Construction & Demolition Sector, Module L2m5-1 in WR1403, Business Waste Prevention Evidence Review, London.
33. Zero Waste Alliance, URL available: <http://zwia.org/zero-waste-definition/>
34. Elgizawy, S., El-Haggar, S. and Nassar, K. (2016). Approaching Sustainability of Construction and Demolition Waste Using Zero Waste Concept. Low Carbon Economy, 7, 1-11. doi: 10.4236/lce.2016.71001.
35. BREEAM, URL Available at: <https://www.breeam.com/> (Accessed on 3.10.2019)
36. LEED, URL Available at: <https://new.usgbc.org/leed> (Accessed on 3.10.2019)
37. Smart Waste, URL Available at: <http://www.smartwaste.co.uk/smartstart/about.js p> (Accessed on 1.1. 2019).
38. ICC-ES Program, URL Available at: <https://icc-es.org/environmental-program/> (Accessed on 1.1. 2019).
39. International Green Construction Code (IGCC) URL Available at: <https://www.iccsafe.org/products-and-services/i-codes/2018-i-codes/igcc/> (Accessed on 1.1. 2019).
40. National Association of Homebuilders (NAHB) URL Available at: <https://www.nahb.org/> (Accessed on 1.2.2019).
41. UK Regulations: URL Available at: <http://www.legislation.gov.uk/ukxi/2013/2854/regulation/2/made>, (Accessed on 2.2.2019)
42. EU Waste Catalogue, URL Available at: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.C\\_.2018.124.01.0001.01.ENG&toc=OJ:C:2018:124:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.C_.2018.124.01.0001.01.ENG&toc=OJ:C:2018:124:TOC) (Accessed on 5.5.2019).
43. EU Waste Framework (2008), URL Available at: [https://ec.europa.eu/environment/waste/framework/pdf/guidance\\_doc.pdf](https://ec.europa.eu/environment/waste/framework/pdf/guidance_doc.pdf) (Accessed on 1.1. 2019).

44. EU Waste Incineration Directive, URL Available at: <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/links/waste-incineration-directive-2000-76-ec>, (Accessed on 5.5.2019).
45. EU Standards, URL Available at: <https://standards.cen.eu/>, (Accessed on 6.5.2019).
46. Zero Waste, URL Available at: <https://sifiratik.gov.tr/sistem-kurulumu/belediyeler-icin> (Accessed on 15.4.2020)
47. Wilks D.S., (1995). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, V59, Chapter 4, Pages 64-113, URL Available on: [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(06\)80040-9](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(06)80040-9), (Accessed on 6.5.2019).
48. Nsowah-Nuamah N. N. (2018). Theoretical Probability Distributions, A first Course in Probability Theory – Volume II, ISBN: 978-87-403-2194-4

## Estimating Fluid Parameters of Submarine Outfall Using Neural Networks

Engin Gücüyen<sup>1</sup>, Recep Tuğrul Erdem<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Manisa Celal Bayar University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Manisa, Turkey, ORCID 0000-0001-9971-8546

<sup>2</sup> Manisa Celal Bayar University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Manisa, Turkey, ORCID 0000-0002-8895-7602

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 25 December 2019

Received in revised form

3 January 2020

Accepted 27 January 2020

Available online 15 June 2020

#### Keywords:

Numerical Analysis, Submarine Outfalls, Finite Element, FSI, ANN

### ABSTRACT

Disposal of the urban and industrial liquid waste has become important by paying attention to environmental and human health recently. Submarine outfall diffusers are the major parts of the marine disposal systems. Pipe of the diffuser, risers and ports, internal and external flows which form the discharge system are modelled and fluid-structure interaction (FSI) method is utilized by ABAQUS finite elements program. Coupled CFD & Explicit technique is performed in FSI analysis. Method of bidirectional fluid-structure interaction (FSI) is used in finite elements method (FEM). Internal and external flows constitute fluid domain and diffuser constitutes the structure domain. While internal velocity and pressure values are obtained from the program, predictions of these results are performed by Artificial Neural Network (ANN) analysis. The average discharge velocities provide to avoid water intrusion into the ports. According to results obtained by FEM it can be said that the discharge system works efficiently. Numerical and estimated values are compared and the relationship between these values is investigated. The correlation coefficients are calculated by using numerical and estimated values and it is observed that a strong relationship is obtained between them.

Doi: 10.24012/dumf.650657

### Introduction

Submarine outfall diffusers, placed at the end of the ocean disposal systems, have wide range of utilization area in transferring urban and industrial liquid wastes. Intended use of diffusers is to prevent ocean environment from environmental impacts related with health, aesthetic and ecological affects [1, 2]. Diffusers are a part of submarine outfall systems. Submarine outfalls are composed of onshore headwork (e.g. gravity or pumping basin), the feeder pipeline conveying the effluent to the disposal field and the diffuser section, where a number of ports releases and disperses the effluent into the environment in order to minimize the impacts on the quality of the receiving water body [3].

Marine structure models, such as submarine outfalls, contain fluid and structure domains which interact with each other. Coupled system occurs when two or more physical systems interact with each other. Fluid-structure interaction (FSI) can be given as an example of a coupled system. In this system, the physical systems are fluid and structure ones. The structure may be movable or deformable. On the other hand, the fluid flow may be internal or external for this system. Forces because of a moving fluid are effected as pressure on the structure that will be deformed later.

\* Corresponding author

Recep Tuğrul, Erdem

✉ e-mail [tugrul.erdem@cbu.edu.tr](mailto:tugrul.erdem@cbu.edu.tr)

Determination of coupling fluid dynamics and structural dynamics codes are not easy by the reason of various domain discretization (fluid grids vs. FE-meshes) and particular numerical method while solving the governing equations. Numerical procedures are effective in estimating hydrodynamic motion and forces on the offshore structures and they become more attractive with the development of computer science [4, 5]. In the study of Gücüyen [6] bidirectional FSI analysis is performed to determine the discharge velocity, displacement and stress values of the diffuser in marine environment. Thereby, discharge velocity that can't be calculated from one-directional FSI analysis is obtained. Discharge velocity which is an important parameter for the effective use of diffuser is semi-analytically determined by Bleninger et al.[7].

Artificial neural networks (ANN) can be counted as one of the artificial intelligence applications which are widely utilized while modeling a number of human activities in several scientific fields. ANN analysis is used by scientists and engineers to estimate results. It is also proper to generate software about engineering problems. The importance of techniques as ANN and fuzzy logic approaches have increased considerably. They are being used to solve a whole range of engineering applications [8-12]. ANN can be both applied to experimental and numerical models. Erdem [13] has studied the impact parameters of a reinforced concrete slab that is tested under impact loading by using a test setup. Test results are estimated by and ANN analysis. It is stated that ANN analysis is an effective way to estimate the test results successfully. In the study of Edincliler et al. [14] damping ratio and shear modulus of sand-waste tire mixtures are predicted and the results are verified by experimental results. Zhao et al. [15], propose effective approach by combined using of CFD (Computational Fluid Dynamics), multi-objective genetic algorithm and artificial neural networks (ANN) for a double-channel pump's impeller and state the accuracy of results. El-Abbasy et al. [16] have determined the corrosion behavior of three existing pipelines by ANN analysis. Predicted results approach to %97 accuracy by regression analysis. As it is seen from literature research, verification of predicted

ANN results can be made by experimental, regression and finite elements methods.

In this study, internal velocity and pressure values of the diffuser pipe of submarine outfall are computed according to finite elements analysis [17] in the first place. It can be said that the FEM model works efficiently according to conditions given by [18-20]. Afterwards, these values are estimated by using ANN analysis. For this purpose, a multi-layer feed-forward and back propagation ANN algorithm is used. The relationship among analyses is extensively presented in figures and suggestions are proposed.

### Finite Elements Analysis

In this study hydraulic design of outfall diffuser is performed by ABAQUS via FSI. For this purpose, 24 m long, fixed supported, two-span diffuser is modeled as seen in Figure 1. The model is discharging salty cooling water whose flow rate is  $0.254 \text{ m}^3/\text{s}$ .

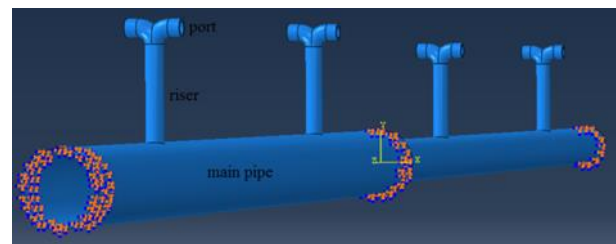


Figure 1 Diffuser model with supports

0.40 m long supports are placed at the beginning, in the middle and at the end of the model. Vertical ports with 1 m long are placed to make the distances between them as 6 m. While main pipe whose diameter value is 0.60 m in the first span, it is 0.50 m in the second one with wall thickness of 0.01 m. Diameter values of both risers and ports are considered as 0.12 m with the same thickness of main pipe. A riser has two bell mouthed ports [21]. Material of the model is steel whose Young's Modulus is  $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , Poisson ratio is 0.30 and density value is  $7850 \text{ kg/m}^3$ . The models are separated into small elements to analyze complex models in the finite elements method. 10-node modified tetrahedron shaped elements (C3D10M), suitable for contact problems, are utilized in the

simulations. Mesh distances are determined as 0.01 m on ports and risers that is the same value of wall thickness and 0.05 m on diffuser pipe.

431060 nodes and 218612 elements are generated in diffuser model by utilizing the mentioned sizes.

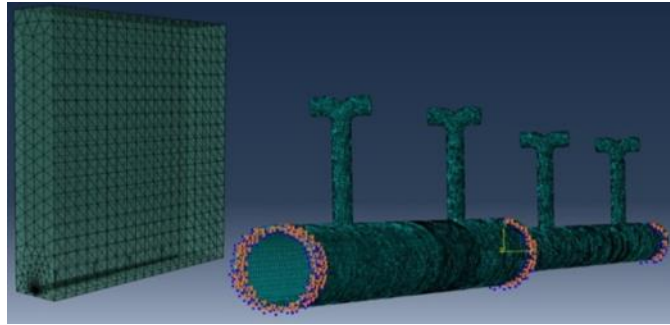


Figure 2 Mesh structure of fluid and diffuser

The diffuser model is seen in the right side of Figure 2, is located in fluid domain which is in the left side of figure. The fluid domain consists of internal and external domains that interact each other. The size values of the domain are 30 m in the diffuser direction, 2.0 m perpendicular to diffuser direction and 25 m in the vertical direction (d).

Domain sizes are decided by considering diffuser geometries and the conditions that are given by [22-24]. Discharge should be at a depth of 20 m or more, if the natural ocean topography enables. When sewage materials including floatable substances such as particles of fruit, faeces etc, are discharged at a depth of 20 m or more, the resulting pressure modifies the material so that it no longer floats. The effect of port spacing depends on the ratio  $s/d$  (the spacing between ports is  $s$ , water depth is  $d$ ). If the ports widely spaced i.e.  $s/d \gg 1$  the individual plumes do not merge and they behave isolated, point plumes. As the ports are brought closer together, the plumes merge and dilution decrease. When  $s/d \approx 0.3$  the ports are close enough that the plume limits is reached.

Properties of the fluid are selected to represent water at sea whose density is  $1025 \text{ kg/m}^3$  and dynamic viscosity is  $0.0015 \text{ Ns/m}^2$ . FC3D4 (4 node modified tetrahedron) elements that are compatible with FSI applications are used to model the fluid domain. The value of mesh distances is utilized as 0.01 m on ports and the same value of wall thickness. However, mesh distance is taken as 1 m for the rest of the

geometry. Fluid domain is generated by 28136 nodes and 141126 elements.

The equations of motion simplified to incompressible Navier-Stokes equations that are presented between Eqs. (1-3) are used by CFD technique.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

The velocity components  $u$ ,  $v$ ,  $w$  and the body force components  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  correspond to  $x$ ,  $y$  and  $z$  directions respectively.  $\rho$  corresponds to density,  $\nu$  represents kinematic viscosity and  $P$  symbolizes pressure in the related equations.

The analysis is driven by applied two velocity inlets. One is on the diffuser pipe as the fluid inlet velocity with 0.90 m/s that corresponds to flow rate. The other one is on the external flow wave velocity. Equation of velocity,

representing the Linear Wave Theory is applied to outlet domain as presented below.

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(y+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (4)$$

Where H, T are known as wave height and period and d is also water depth where the structure deploys. In this study, employed parameters are considered respectively: H=3.0 m, T=8 s and d=25 m. Wave length (L=99.92 m) is determined by using these parameters. Wave motion is in the lateral direction (x) of the diffuser. In this paper, while the value of relative depth d/L is between 0.05 and 0.5, the wave is intermediate water depth as mentioned.

Fluid pressure is defined as zero at external flow outlet surface at x direction. Bottom of the external flow is matched with wall boundary condition on which all velocity components equal to zero. The rest of the surfaces excluding contact surfaces are assigned as far field where velocity is supposed to be equal to inlet velocity.

In this study, FSI method is adopted to model interaction between fluid and structure domains. This method represents several multi-physics solutions in which fluid flow effects compliant structures, which in turn effects the fluid flow. Contact surfaces are determined in the first step of FSI analysis. Afterwards, the forces are transferred from fluid to structure and transfer of deformations from structure to fluid is also determined.

The pressure loads (P) obtained from CFD solver are transferred to solid domain via FSI technique on contact surfaces. After Eq. (5) is utilized to determine the displacements via Explicit technique, the values are transferred to fluid according to FSI analysis.

$$m^{NJ} \ddot{X}_i^N = (P^J - I^J)|_i \quad (5)$$

$$\dot{X}_{(i+\frac{1}{2})}^N = \dot{X}_{(i-\frac{1}{2})}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{X}_i^N \quad (6)$$

$$X_{(i+1)}^N = X_{(i)}^N + \Delta t_{(i+\frac{1}{2})} \dot{X}_{(i+\frac{1}{2})}^N \quad (7)$$

In Eqs. (6-7),  $X^N$  and  $\dot{X}^N$  are degrees of freedom, (N) of displacement and velocity components respectively. Nodal accelerations are determined according to Eq. (8).

$$\ddot{X}_{(i)}^N = (m^{NJ})^{-1} (P_i^J - I_i^J) \quad (8)$$

Values of velocity and displacement may also be calculated after determining acceleration values. In this paper, analysis duration is 8 s with the time increment of 0.01 s.

### Artificial Neural Networks

Artificial neural networks are defined as computing systems which can simulate the biological neural systems of the human brain. ANN analysis is a complicated system which is developed by neurons which are connected to each other with various effect levels. The method is based upon biological models of the functions of human brain. ANN have been inspired by biological findings in relationship with the behavior of the brain as a network of units that are names neurons. This technique enables investigation of the relationship between data by simulating the structure of biological neural networks.

Computation is modeled as a big network of interconnected processors. ANN may also be trained to determine input patterns and produce proper outputs. Applications having enough training data are applicable to ANN. Estimation of the complicated examples and rapid evaluation of problems can be given as the principal advantages of ANN.

Basic sciences allow modeling the neurons in human brain mathematically in recent years. ANN analysis which is widely used to solve complex engineering problems is utilized in various research areas such as modeling, classification and prediction. In other words, ANN analysis is a parallel computational system which consists of several simple processing elements that are connected together in a specific way to perform an important task. The common type of artificial neural network contains three or



more layers. These layers named as input, output and hidden layers where neurons are subjected to each other with modifiable weighted interconnections as presented in Figure 3.

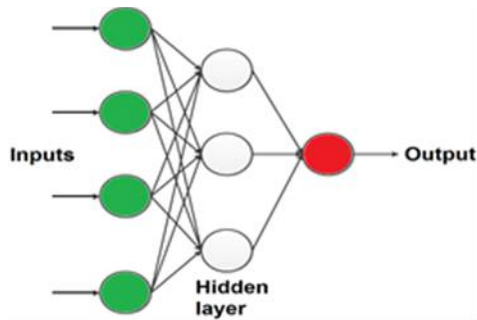


Figure 3 ANN architecture

Input layer, one or more hidden layers according to problem and an output layer are the counterparts of the ANN analysis. Layers that take place among the input and output layers are known as hidden layers. Data of the problem is separated into training and testing datasets. While training data includes the 70-80% of the total data, the rest is utilized for testing data.

The architecture of ANN represents an absolutely interconnected feed forward multilayer perceptron. Neurons in the layers depend on the type of the problem. A suitable model is required for ANN analysis. While there are several ANN architecture types, the most successful type in data mining is the multi-layer

feed forward networks. Back propagation is the classic neural network learning algorithm due to its simplicity and universal capacity of approximation. This algorithm provides the minimum error function in weight space by using the method of the gradient decent. Besides, it identifies a systematic way to update the synaptic weights of multi-layer feed forward networks that are consisted of neurons. This analysis makes computational devices more effective and improves human performance.

**Results**

In this paper, internal velocity and pressure values of the diffuser pipe of submarine outfall are obtained according to finite elements analysis (ABAQUS) in the first step. Fluid structure interaction (FSI) is performed to complete numerical analysis. Subsequently, obtained values are estimated by ANN analysis.

The visualization of FEM results of velocity and pressure values are seen in Figure 4. The average results of FEM for internal velocity and pressure values are given in Table 1. Nodes are chosen to be along a streamline following the diffuser pipe centerline. The nodes are numbered in ascending order starting with inlet of the main pipe and ending at the last riser which is located at the end of the model.

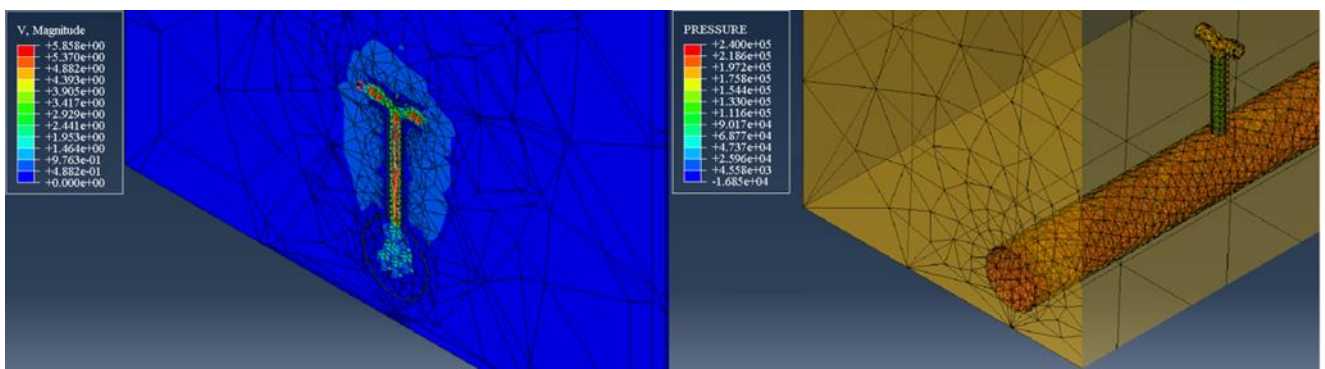


Figure 4 Velocity and pressure distribution of flow domain

**Table 1** Internal velocity and pressure values of FEM

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Velocity $u/$ (m/s)	0.899	0.834	0.869	0.941	0.983	0.992	0.984	0.986	0.810	0.754
Pressure $P/$ (N/m <sup>2</sup> )	217663	217024	216924	216523	216046	215922	215520	215712	215472	215062

Node	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Velocity $u/$ (m/s)	0.721	0.715	0.714	0.715	0.718	0.717	0.995	0.716	0.724	0.874
Pressure $P/(\text{N/m}^2)$	214999	214771	214529	214338	213188	213721	215224	212893	212552	212176
Node	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Velocity $u/$ (m/s)	0.846	0.837	0.826	0.836	0.767	0.756	0.667	0.612	0.631	0.675
Pressure $P/(\text{N/m}^2)$	211777	211688	211090	210001	210886	211384	210767	210528	210507	210615
Node	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Velocity $u/$ (m/s)	0.685	0.672	0.789	0.823	0.803	0.851	0.903	0.946	0.954	0.982
Pressure $P/(\text{N/m}^2)$	210462	210073	210115	209943	209237	209104	208686	208384	208279	208178
Node	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Velocity $u/$ (m/s)	1.109	1.181	1.237	1.524	1.517	1.492	1.458	1.413	1.439	1.417
Pressure $P/(\text{N/m}^2)$	207868	207738	207614	211946	210089	209086	208848	208091	207752	207099
Node	51	52	53	54	55	56	57			
Velocity $u/$ (m/s)	1.479	1.389	1.379	1.369	1.34	1.296	1.288			
Pressure $P/(\text{N/m}^2)$	206221	206049	205775	205317	205285	205115	204143			

This paper is primarily concerned with the estimation of velocity and pressure values of the diffuser pipe according to ANN analysis. The dataset is separated into training and testing sets by feed-forward back propagation algorithm that is available by the neural network toolbox of the Matlab [25] software. Thus, several Matlab subroutines have been developed to perform analysis. There are 43 data in training set and 14 data in testing set taking place in the database. There is a hidden layer as well as an input and output layer in the architecture of network. While material type, span lengths are constant inputs, section sizes are taken as varied ones. Besides, internal velocity and pressure values are the output parameters of the network.

Several trials are performed to reach the most convenient architecture of network. Before performing analysis, the test data is normalized by using simple normalization methods. The pre-processing operation directs the data in a new form to train the network. Scaled Conjugate Gradient (SCG) is utilized as the training function in the analysis and 3000 iterations are utilized to reach the optimum result. Dispersion and performance of the training and testing sets are determined after ANN analysis. While results related to velocity values are given in Figures 5 and 6, pressure values are given in Figures 7 and 8.

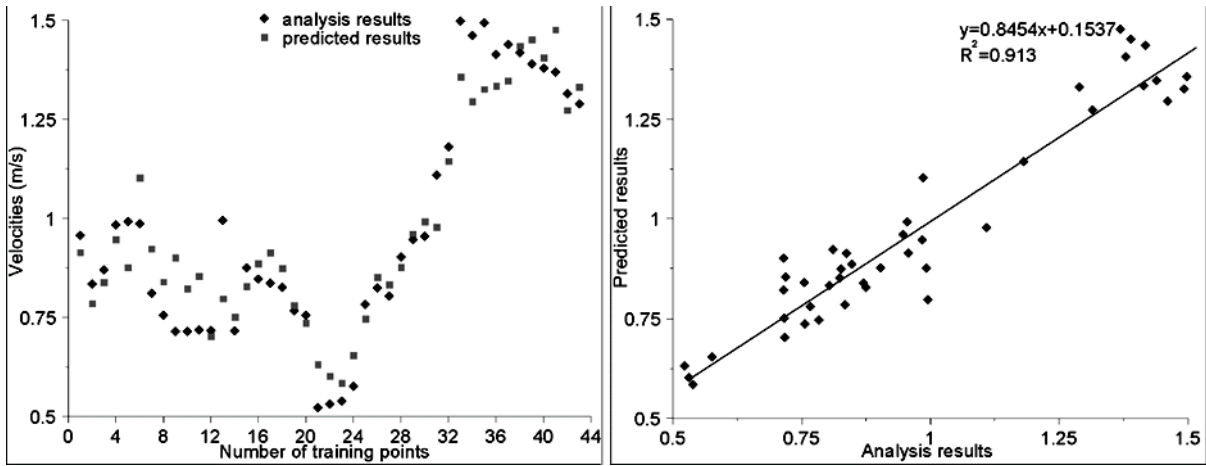


Figure 5 Training set for velocity values

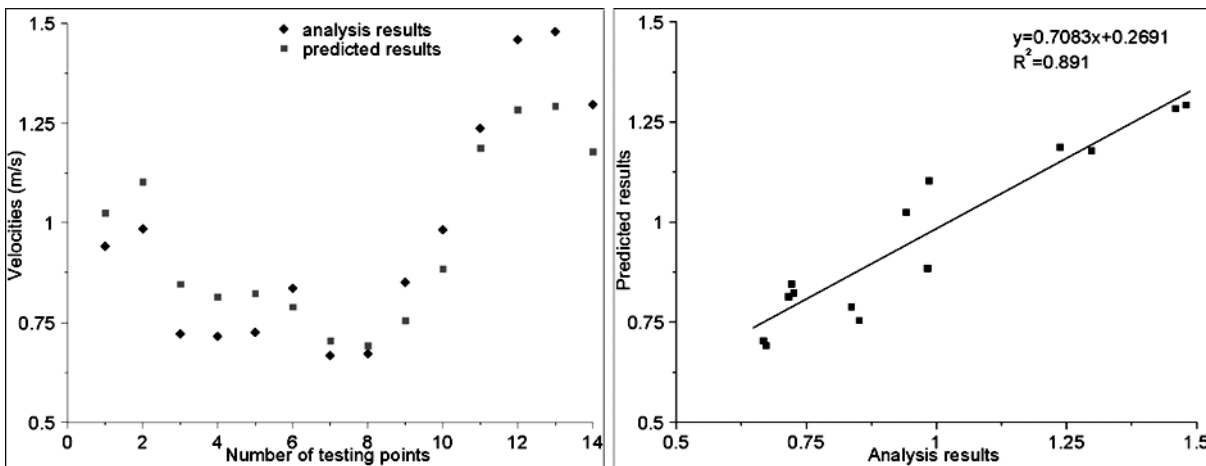


Figure 6 Testing set for velocity values

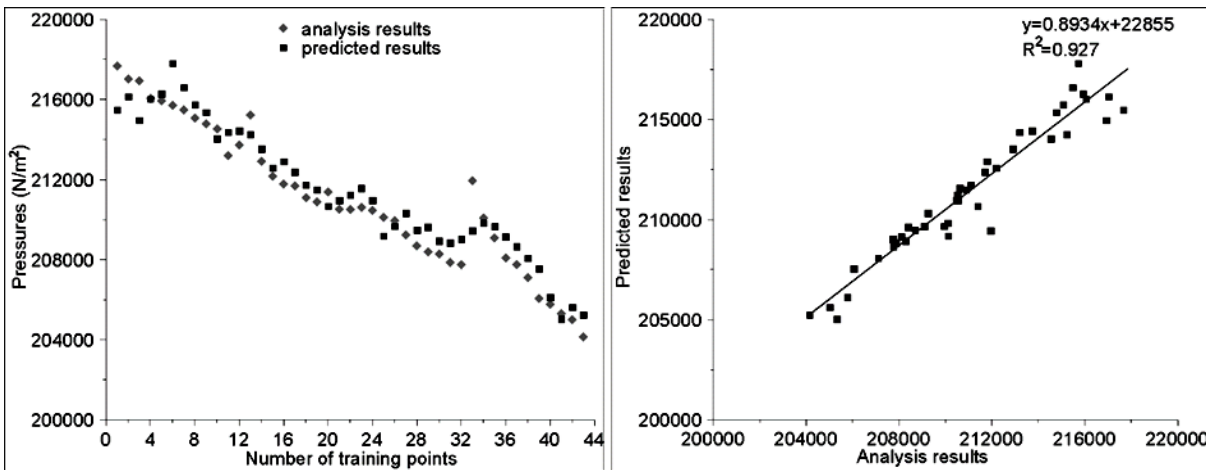


Figure 7 Training set for pressure values

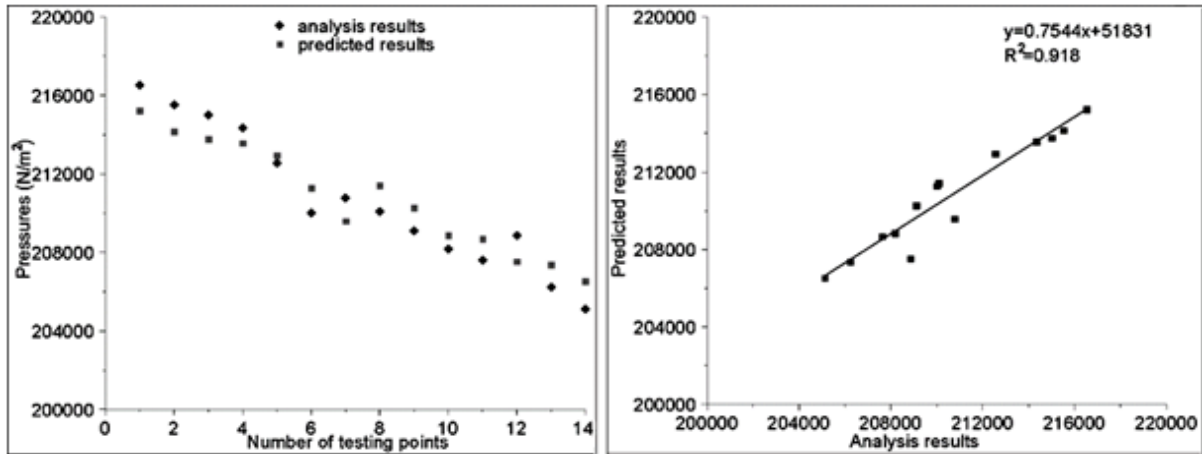


Figure 8 Testing set for pressure values

The performance of the network is utilized according to correlation coefficients ( $R^2$ ) of determination for the finite elements analysis and estimated values of the dataset. These coefficients present the relationship between analysis and estimated results. Accordance level of the values is determined according to correlation coefficients by using Eq. (9) that is given below.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2 \quad (9)$$

Correlation coefficients ( $R^2$ ) are accepted as performance standards in ANN analysis. They determine the suitability level of the values. These coefficients that are calculated according to Eq. (9) give information about the relationship between experimental and estimated results. While correlation coefficient of the training set is calculated as  $R^2=0.913$ , it is determined as  $R^2=0.891$  for the testing set after analyses of velocity values. On the other hand, the related coefficient is calculated as  $R^2=0.927$  and  $R^2=0.918$  for training and testing sets of pressure values respectively. The results of correlation coefficients which give information about the success of prediction according to each analysis are summarized in Table 2.

**Table 2.** Correlation coefficients

Velocity values		Pressure values	
$R^2$ (training)	$R^2$ (test)	$R^2$ (training)	$R^2$ (test)
0.913	0.891	0.927	0.918

### Discussion

In this study, internal velocity and pressure values of the diffuser pipe of submarine outfall are obtained by finite elements analysis via FSI and these values are estimated by ANN. In finite elements analysis, fluid and structure domains are modeled by ABAQUS finite elements program which is widely used for dynamic analyses. After, domain sizes and flow conditions are defined, analyses are performed. For this purpose, 24 m long, fixed supported, two-span diffuser is modeled. Cooling water whose flow rate is  $0.254 \text{ m}^3/\text{s}$  is being discharged into the sea at the depth of 25 m by submarine outfall. Steady discharge flow is interacting with the unsteady ambient which is represented by Linear Wave Theory. Both internal and external flows are interacting the diffuser model.

To make discharge system effective, inner-outer flow velocity and pressure values shall provide the conditions given in the literature. The velocity in the pipe shall be high enough to scour and prevent deposition of particles; this will be concluded by peak flow velocity values between about 0.6 and 2.5 m/s. In this study these values vary between 0.621 m/s and 1.524 m/s. On the other hand, internal pressure values vary between  $204143 \text{ N/m}^2$  and  $217663 \text{ N/m}^2$ . Higher values of internal pressure than external pressure values are obtained as it is seen in Figure. 4. The values of discharge velocities are bigger than external flow velocities as shown in Figure. 4. The average discharge velocities are obtained as 4.04 m/s which satisfy Froude number  $>1$ . Water intrusion into the ports is avoided by this way.

According to results obtained by FEM it can be said that the discharge system works efficiently.

ANN analysis is combination of mathematical and numerical methods which provide information and simulation of the results from computational models. This analysis is used for several engineering problems to reduce workload by predicting results accurately. The internal velocities and pressure values of diffuser pipe are obtained by FEM and these values are also tried to be estimated. For this purpose, neural network toolbox of the Matlab software is utilized. A computer program is established to calculate the values. Ultimately, the correlation coefficients are calculated by using obtained and estimated values and it is observed that a strong relationship is obtained between them. The correlation coefficient values are determined as  $R^2=0.913$ , it is determined as  $R^2=0.891$  according to training and test process of velocity values. The values of these coefficients are calculated as  $R^2=0.927$  and  $R^2=0.918$  for pressure values.

Thus, the created ANN model can be used as an alternative approach to predict the internal velocity and pressure values of the diffuser pipe. ANN results are in accordance with finite elements analysis results according to this study. FSI analysis requires high computer capacity. However, ANN reduces the analysis time of computers. Therefore, ANN analysis is considered to be more practical for non-visual models.

## References

- Mendonça, A.; Losada, M.A, Reis, M.T, Neves, M.G. Risk assessment in submarine outfall projects: The case of Portugal. *J Environ Manage* **2013**, *116*, 186-195.
- Losada, A.M; Benedicto, M.I. Target design levels for maritime structures. *J Waterw Port Coast* **2005**, *131*, 171-180.
- Bleninger, T, Jirka, G.H, User's Manual for Corhyd: An internal diffuser hydraulics model, Version 1.0; University of Karlsruhe, Germany, 2005; pp 84.
- Aksenov, A, Dyadkin, A, Luniewski, T, Pokhilko, V, Fluid Structure Interaction Analysis Using Abaqus and Flowvision, proceedings of the Comsol Conference, Belgium, 2004, pp 39-47.
- Gücüyen, E; Analysis of offshore wind turbine tower under environmental loads. *Ships Offshore Struc* **2017**, *12(4)*, 513-520.
- Gücüyen, E; Analysis of submarine outfalls subjected to wave load. *Građevinar* **2015**, *67(8)*, 1-10.
- Bleninger, T, Perez, L.M, Milli, H, Jirka, G.H, Internal Hydraulic Design of a Long Diffuser in Shallow Water: Buenos Aires Sewage Disposal in Rio De La Plata Estuary, proceedings of XXXI IAHR Congresses, Seoul, S.Korea, 2005, pp 1-11.
- Yan, Y; Wang, L, Wang, T, Wang, X, H, Yonghui, Duan, Q. Application of soft computing techniques to multiphase flow measurement: A review. *Flow Meas Instrum* **2018**, *60*, 30-43.
- Mrzygłód, B; Hawryluk, M, Gronostajski, Z, Opaliński, A, Kaszuba, M, Polak, S, Widomski, P, Ziemb, J. Durability analysis of forging tools after different variants of surface treatment using a decision-support system based on artificial neural networks. *Arch Civ Mech Eng* **2018**, *18(4)*, 1079-1091.
- Rafiq, M.Y, Bugmann, G, Easterbrook, D.J, Neural network design for engineering applications. *Comput Struct* **2001**, *79*, 1541-1552.
- Zurada, J.M. *Introduction to artificial neural networks*; West Publishing, St. Paul, USA, 1992; pp 683.
- Vazirizade, S.M; Nozhati, S, Zadeh, M.A. Seismic reliability assessment of structures using artificial neural network. *J. Build. Eng* **2017**, *11*, 230-235.
- Erdem, R.T; Prediction of acceleration and impact force values of a reinforced concrete slab. *Comput Concrete* **2014**, *14(5)*, 563-575.
- Edinçliler, A; Cabalar, A.F, Cevik, A, Modelling dynamic behaviour of sand-waste tires mixtures using Neural Networks and Neuro-Fuzzy. *Eur J Environ Civ En* **2013**, *17(8)*, 720-741.
- Zhao, B; Wang, Y, Chen, H, Qiu, J, Hou, D, Hydraulic optimization of a double-channel pump's impeller based on multi-objective genetic algorithm, *Chin J Mech Eng-En* **2015**, *28(3)*, 634-640.
- El-Abbasy, M.S; Senouci, A, Zayed, T, Mirahadi, F, Parvizesdghy, L, Artificial neural network models for predicting condition of offshore oil and gas pipelines, *Automat Constr* **2014**, *45*, 50-65.
- Abaqus/CAE 6.10, 2010.
- Öztürk, İ. Deniz deşarj tesisleri tasarımı; Su Vakfı Yayınları, Turkey, 2011, pp 458.
- Fischer, H.B, List, E.J, Koh, R.C.Y. Imberger, J, Brooks, N.H, Mixing in inland and coastal waters; Academic Press, USA, 1979, pp 497.

20. Singh, V, Hager, W.H., Environmental hydraulics; Springer, 1996, pp 397.
21. S Chiban, A Terfous, A Ghenaim, Salman, H, Sabat, M, Sedimentation in the submarine outfall and in the mixing zones (Avoiding, diagnosis and remediation), *Journal of Shipping and Ocean Engineering* **2011**, 1, 124-132.
22. Ludwig R.G, Environmental impact assessment, siting and design of submarine outfalls; Monitoring and Assessment Research Centre, England, 1988, pp 64.
23. Agudo, E.G, Amaral, R, Berzin, G, Evaluation of the efficiency of santo/sao vicente preconditioning station for an oceanic submarine outfall, *Water Sci Technol* **1986**, 18(11), 83-91.
24. Roberts, P.J.W, H. Salas, J Reiff, F.M, Libhaber, M, Labbe, A, Thomson, J,C, Marine wastewater outfalls and treatment systems; IWA Publishing, 2010, England, pp 528.
25. Labbe, A, Thomson, J,C, Marine wastewater outfalls and treatment systems; IWA Publishing, 2010, England, pp 528.
26. Matlab V 6.5. 2002. The Math Works, Inc.